



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ANALÝZA ŘEZÁNÍ TENKOSTĚNNÝCH SOUČÁSTÍ PILOU

ON THE ANALYSIS OF THIN-WALL PARTS SAWING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Radek Spáčil

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

BRNO 2018

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Radek Spáčil**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.**
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Analýza řezání tenkostěnných součástí pilou

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Na základě studia literatury a vybraného výrobního procesu s využíváním řezání tenkostěnných součástí pomocí kotoučových pil navrhnout jeho technologické zlepšení.

Cíle diplomové práce:

- Teoretický rozbor problému
- Analýza silového zatížení řezání tenkostěnných součástí kotoučovou pilou
- Návrhy pro výrobní praxi, verifikace návrhů a řešení

Seznam doporučené literatury:

- TLUSTY, J. Manufacturing Process and Equipment. Prentice Hall, 1999. 928 s. ISBN 10-0201498650.
- DE CHIFFRE, L. Mechanical testing and selection of cutting fluid, Lubr. Eng., 1980, vol. 36. pp. 33-39.
- DE CHIFFRE, L. Mechanics of metal cutting and cutting fluid action, Int. J. Mach. Tool Des. Res., 1977, vol. 17. pp. 225-234.
- DE CHIFFRE, L. Testing the overall performance of cutting fluids, Lubr. Eng., 1978, vol. 34. pp. 244-251.
- DE CHIFFRE, L. Cutting fluid action, testing and selection, Int. Yearbook of Tribology, W. J. Bartz (ed.), Expert Verlag, Grafenau, 1982. pp. 769-773.
- DE CHIFFRE, L. Laboratory testing of cutting fluid performance, 3rd Int. Coll. Tribol., TAE Proceedings, 1982. 74.1-74.5.
- DE CHIFFRE, L. Function of cutting fluids in machining, Lubr. Eng., 1988, vol. 44. pp. 514-518.

DE CHIFFRE, L. Mechanical testing and selection of cutting fluids in laboratory and workshop, Eurometalworking, 1992, vol. 92. pp. 102-106.

FOREJT, M. a PÍŠKA, M. Teorie obrábění, tváření a nástrojů. VŠ učebnice. Brno: CERM, 2006. 230 s. ISBN 80-214-2374-9.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá řezáním tenkostěnných součástí pomocí kotoučové pily z rychlořezné oceli. Nejprve jsou formou rešerše ukázány nejpoužívanější konvenční a nekonvenční možnosti dělení materiálu. Další kapitola popisuje síly vznikající při obrábění kotoučovou pilou, včetně jejich závislosti na měrném řezném odporu, průřezu třísky a úhlu posuvového pohybu. Druhá část práce se zabývá technologickým zlepšením procesu řezání, kdy jsou uvažovány tři možné směry řešení – geometrie nástroje, depozice nástroje PVD povlakem a změna procesní kapaliny. V experimentální části proběhlo porovnání nepovaľkovaného kotouče s otřepy, odjehleného nepovaľkovaného kotouče a povaľkovaných pilových kotoučů. Pro srovnání byly použity povlaky Ti(C,N), Cr-Al-Si-N, Al-Cr-B-N a TripleCoating Cr, který se skládá ze tří, na sebe vrstvených povlaků TiN + (Al,Ti)N + Cr-Al-Si-N. Z experimentu vyplynulo, že řezné síly se zvětšovaly se zvětšujícím se poloměrem špičky a opotřebením řezného nástroje. Menší rozdíly měřených řezných sil mezi prvním a posledním průjezdem vykazovaly povaľkované řezné nástroje. Následně byly pilové kotouče použity v reálné výrobě, aby byly ověřeny výsledky experimentu.

Klíčová slova

pilový kotouč, PVD, austenitická korozivzdorná ocel, tenkostěnné součásti, rychlořezná ocel

ABSTRACT

Master's thesis deals with sawing of the thin-walled parts with high speed steel slitting saw. At first the most used conventional and unconventional possibilities of material cutting are described by a form of search. The next chapter describes forces arising from splitting saw machining, including their dependence on a specific cutting force, a chip cross section and an engagement angle. The second part of the thesis deals with the technological improvement of the cutting process, where three possible solutions are considered – geometry of the cutting tool, PVD coating deposition of the cutting tool and process fluid change. In the experimental part non coated slitting saw with burrs, non coated deburred slitting saw and coated slitting saws are compared. Used coatings were Ti(C,N), Cr-Al-Si-N, Al-Cr-B-N, and TripleCoating Cr, which is consisting of three layers TiN + (Al,Ti)N + Cr-Al-Si-N. The experiment has shown that the cutting forces increase as the edge radius and wear level of the cutting tool increase. Coated cutting tools have shown lower differences between the first and the last cut. Slitting saws have been also used in real cutting process to verify experimental results.

Key words

slitting saw, PVD, austenitic stainless steel, thin-walled parts, high speed steel

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SPÁČIL, R. *Analýza řezání tenkostěnných součástí pilou*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 106 s. 1 příloha. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Analýza řezání tenkostěnných součástí pilou** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Bc. Radek Spáčil

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto panu prof. Ing. Miroslavu Píškovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Dále bych rád poděkoval firmě fischer Vyškov, s.r.o., jmenovitě pak panu Ing. Martinu Petrencovi, Ph.D., panu Ing. Pavlu Alánovi a panu Jiřímu Fučíkovi za poskytnutí rad a dalších prostředků pro vypracování diplomové práce. Mé poděkování patří také firmě SHM, s.r.o., zejména pánům RNDr. Pavlu Holubářovi a Romanu Janků, za cenné rady, umožnění úpravy kotoučů před povlakováním a jejich následné povlakování. Také děkuji panu Lukáši Daňkovi z firmy GSP – High Tech Saws, s.r.o. za poskytnuté rady ohledně pilových kotoučů. Děkuji pánům Mgr. Michalu Jílkovi a Jiřímu Čechovi za pomoc při experimentální části v dílnách ÚST na FSI VUT v Brně. V neposlední řadě také děkuji své rodině, která mě podporovala během mého studia a umožnila mi vysokoškolské studium.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ.....	6
PODĚKOVÁNÍ	7
OBSAH.....	8
ÚVOD.....	10
1 TEORETICKÝ ROZBOR PROBLÉMU	11
1.1 Konvenční technologie dělení materiálu	12
1.1.1 Dělení materiálu pomocí kotoučové pily	12
1.1.2 Dělení materiálu pomocí rámové pily	15
1.1.3 Dělení materiálu pomocí pásové pily.....	16
1.1.4 Dělení materiálu rozbrušováním.....	18
1.1.5 Dělení materiálu upichováním.....	19
1.1.6 Dělení materiálu stříháním a lámáním	20
1.1.7 Dělení materiálu třením.....	20
1.2 Nekonvenční technologie dělení materiálu	21
1.2.1 Dělení materiálu vodním paprskem	21
1.2.2 Dělení materiálu laserem.....	22
1.2.3 Dělení materiálu elektronovým paprskem.....	24
1.2.4 Elektroerozivní řezání	24
1.2.5 Dělení materiálu plazmou.....	25
1.3 Kinematika řezání pilovým kotoučem.....	25
1.3.1 Výpočet průřezu třísky při řezání pilovým kotoučem.....	28
2 ANALÝZA SILOVÉHO ZATÍŽENÍ ŘEZÁNÍ TENKOSTĚNNÝCH SOUČÁSTÍ KOTOUČOVOU PILOU	31
2.1 Silové zatížení působící na jeden zub pily	31
2.2 Celková řezná síla pro všechny zuby v záběru	36
3 NÁVRHY PRO VÝROBNÍ PRAXI	38
3.1 Vstupní obráběné materiály	38
3.1.1 Uhlíková ocel.....	38
3.1.2 Austenitická korozivzdorná ocel.....	39
3.2 Výsledný produkt	41
3.3 Používaný řezný nástroj.....	41
3.4 Aktuální způsob obrábění	42
3.5 Návrhy pro výrobní praxi.....	43
3.5.1 Volba geometrie pilového kotouče	43

3.5.2	Volba procesní kapaliny	45
3.5.3	Volba povlakování kotouče	48
4	VERIFIKACE NÁVRHU A ŘEŠENÍ.....	56
4.1	Obráběný materiál	56
4.2	Řezný nástroj.....	56
4.3	Obráběcí stroje	60
4.4	Řezné podmínky	61
4.5	Průběh experimentu	62
4.6	Způsob měření opotřebení	64
4.7	Vyhodnocení opotřebení nástroje	64
4.8	Způsob získávání silového záznamu	68
4.9	Vyhodnocení silového záznamu	71
4.10	Analýza opotřebení pilových kotoučů pomocí elektronové mikroskopie	85
4.10.1	Snímky z elektronového mikroskopu.....	85
4.11	Použití povlakovaných řezných nástrojů v reálném procesu	91
	ZÁVĚR.....	93
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	95
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	103
	SEZNAM PŘÍLOH	106

ÚVOD

Kotoučové pily se používají v drtivé většině případů pro dělení materiálů. Ačkoli tato operace bývá na prvním řádku v technologických postupech, obecně se jí nedostává takové pozornosti, jakou by si zasloužila. Ve strojírenských podnicích jsou nejčastěji k použití „pouze“ pásové nebo rámové pily, případně nějaký druh tepelného dělení materiálu (dělení plamenem). Technolog tudíž nemá až tak „volnou ruku“, při výběru nástroje, případně stroje pro danou operaci, jako u ostatních obráběcích procesů, kde lze volit materiál nástroje, vybírat z nespočtu geometrií nástrojů, nebo volit různé metody obrábění.

Je pochopitelné, že ve firmě, kde se pomocí kotoučových pil pouze dělí materiál na přířezy, se nebude nikdo dopodrobna zabývat vhodnými reznými podmínkami obrábění, nebo jak zrychlit proces dělení. Podle mého názoru je dělení materiálu v průmyslové praxi bráno jako tzv. podřadná operace, a proto se jí nevěnuje až takové pozornosti. Důvodem je i to, že v dalším kroku, po řezání materiálu, dochází (například u soustružení) k zarovnání čel polotovaru a jakékoliv stopy pro řezání, či vzniklé nepřesnosti jsou odstraněny.

Svůj význam ale dělení materiálu začíná mít ve chvíli, kdy výsledná rezná spára bude viditelná na finálním produktu, nebo vytvořené drážky umožňují funkci součástky. Pokud se k tomuto ještě připojí hromadná výroba, ve které se hraje doslova o každou vteřinu, dostáváme se do „zábavního parku“ technologů, kde je prostor pro jakoukoliv dobrou myšlenku, která by posunula výrobní proces kupředu.

Do takového prostředí je zařazena i tato práce, zaměřená na řezání kotoučovou pilou, která vytváří v poslední operaci prováděné na stroji úzkou drážku v trubičce (hmoždince). K otázce zlepšení výrobního procesu se přistupovalo ze tří směrů. Geometrie rezného nástroje, která má velký vliv na celý rezný proces. Řezné prostředí, které také ovlivňuje značnou část činitelů, například utváření třísky, snižování tepla v místě řezu, nebo trvanlivost nástroje. Poslední uvažovanou možností bylo povlakování rezných nástrojů, protože v dnešní době můžeme říct, že dobře zvolený povlak je polovina úspěchu. Počet nabízených povlaků je čím dál tím vyšší, ale bez zkoušek nikdo dopředu nedokáže přesně určit, jaký bude mít povlak vliv na proces. Z této trojice možností byla nakonec vybrána jedna varianta, která je verifikována v experimentální části, jejíž výsledky byly poté ověřeny v praxi.

1 TEORETICKÝ ROZBOR PROBLÉMU

Ve strojírenském podniku se v drtivé většině nachází vstupní materiál v podobě normalizovaných hutních výrobků, které ale nejsou vhodné k tomu, aby přímo vstupovaly do výroby. Prvním krokem, mezi hutním polotovarem a samotnou výrobou součástí je výroba polotovaru. Proto nejvýše postavenou položkou v technologickém postupu tradičně bývá dělení materiálu, které se větví na dvě základní skupiny:

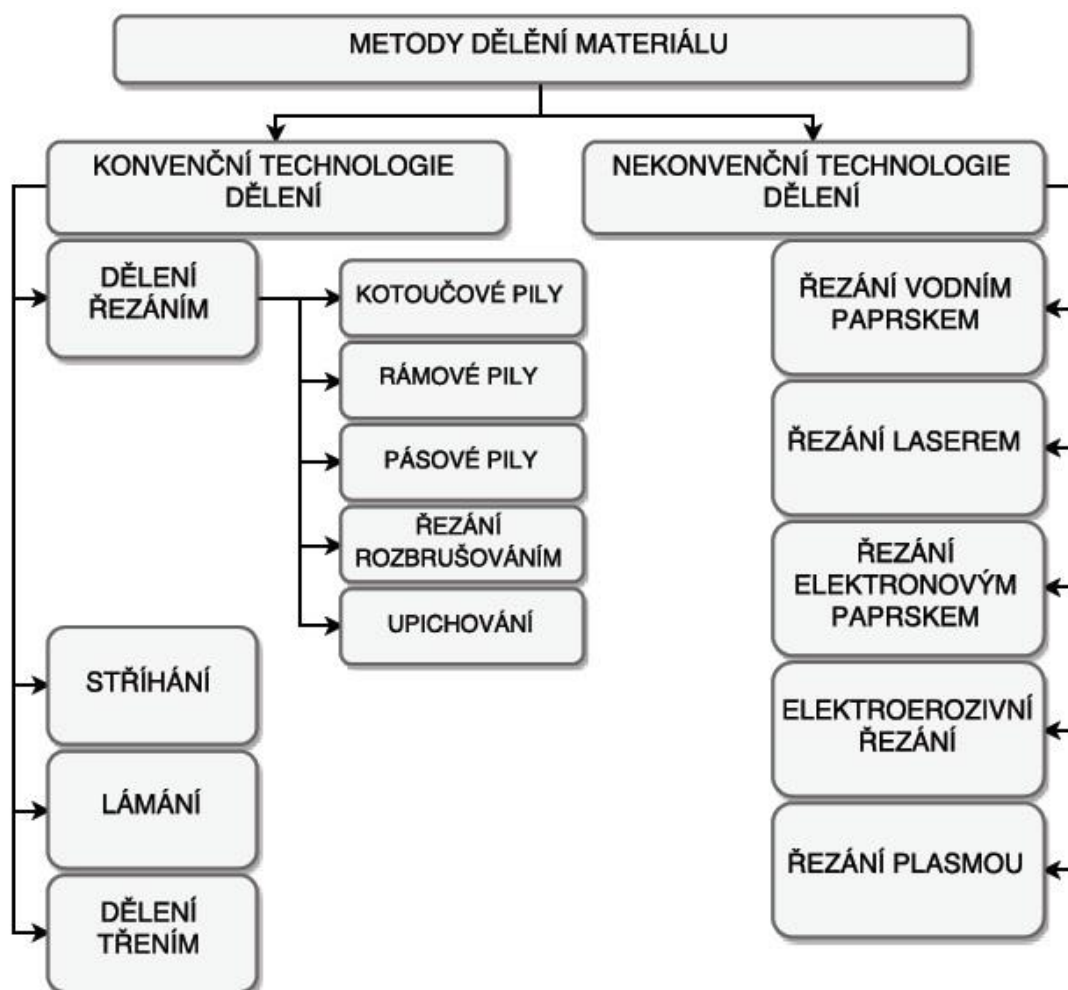
a) Konvenční technologie dělení

- pod tímto pojmem si lze představit takové dělení materiálů, při kterém vzniká tříska.

b) Nekonvenční technologie dělení

- nekonvenční technologie naopak využívají fyzikální nebo chemický úběr materiálů, při kterém nevzniká silové zatížení mezi nástrojem a obrobkem.

Základní rozdělení vybraných konvenčních a nekonvenčních technologií je vidět na následujícím diagramu (obr. 1.1).



Obr. 1.1 Základní metody dělení materiálu [1].

1.1 Konvenční technologie dělení materiálu

Dělení materiálu konvenčním způsobem se rozděluje na čtyři hlavní oblasti:

- řezání,
- stříhání,
- lámání,
- tření.

První uvedená oblast dělení materiálu je zdaleka nejčastější a využívá se v různých variacích ve strojírenských firmách. Řezání je neodmyslitelnou operací především v podnicích, zabývajících se kusovou, či malosériovou výrobou, za účelem výroby polotovaru – přířezu.

1.1.1 Dělení materiálu pomocí kotoučové pily

Kotoučové pily se používají převážně pro dělení tyčového materiálu, nebo pro „frézování“ úzkých drážek. Jedná se o produktivní metodu s dobrou přesností řezné spáry a její nízkou drsností [2,3,4].

Jak je z názvu zřejmé, nástrojem je pilový kotouč, což je nástroj s vysokou hodnotou poměru jeho průměru k tloušťce nástroje. Upínání je realizováno pomocí středového otvoru, který je u větších průměrů s drážkou pro pero nebo s unášecími otvory, čímž se zajistí přenos dostatečného krouticího momentu. Pro menší průměry je otvor hladký. Mají velký počet zubů a nevhodný tvar zubové mezery, což má za následek špatné utváření třísky. Vlivem těchto nedostatků dochází často k vylamování jednotlivých zubů [2,5].

Pily se dělí podle průměru kotouče na:

a) Segmentové

Vyrábějí se od průměru cca 260 mm, v tloušťkách 4÷14 mm. Řezné segmenty vyrobené z rychlořezné oceli (HSS) jsou připevněny na tělo kotouče, který je pro nižší cenu nástroje vyroben z oceli konstrukční. Segmenty jsou spojeny s tělem pomocí nýtů nebo lepením [2,5].

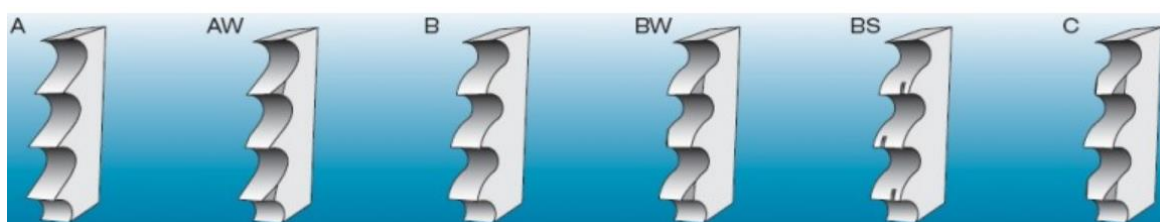
b) Monolitní

Vyrábějí se v průměrech 20÷900 mm s tloušťkou v rozmezí 0,2÷6 mm. Kotouče malých tlouštěk mohou mít v těle vytvořeny dilatační spáry, které umožňují kompenzovat tepelné roztažení nástroje při obrábění. Tím zamezují jeho příčné deformaci, nebo prasknutí během obrábění (obr. 1.2). Mimo dilatačních spár se můžeme u kotoučů setkat také s různými stabilizačními a odhlučňovacími prvky. Pro snadnější přívod kapaliny bývají na bocích nástroje vybrušovány mělké drážky [5,6].



Obr. 1.2 Dilatační spáry pilového kotouče [7].

Hlavní částí kotouče je jeho ozubení, jehož geometrie (obr. 1.3) se mění dle aplikace a je důležité vybrat tu správnou. Mění se především tvar zubů a rozteč zubů. S roztečí zubů souvisí i odvod třísky, je-li špatně zvolená, je pravděpodobné, že se budou třísky hromadit v zubových mezerách, až dojde k ulomení zubu. Pokud materiál vytváří dlouhou třísku, musí se volit větší rozteč mezi zuby [1].



Obr. 1.3 Základní tvary a geometrie zubů pilového kotouče [8].

Nejčastějším typem ozubení jsou typy označovány jako B a BW, které se používají pro dělení železných materiálů. Rozdílem mezi těmito dvěma druhy je ten, že BW ozubení je opatřeno lamačem třísky, kdy jsou zuby střídavě zkoseny na jednu a na druhou stranu do jedné třetiny šířky zubu, tím je tříska rozlomena na dvě části. Typy A a AW se používají převážně pro výrobu šperku ve zlatnictvích. BS ozubení je s výhodou využíváno především pro řezání trubek nebo plných materiálů s vysokou pevností. Zuby mají speciální lamač třísky, který zabezpečuje čistý řez. Ozubení C se používá pro řezání plného materiálu. Používá dva druhy zubů, předřezávací, který je vyšší o 0,2 mm a má na obou stranách zkosení, což způsobí zlomení třísky na tři části. Druhým typem zubů jsou řezací [1,9].

Podle jakosti materiálu, ze kterého je kotouč z HSS vyroben se používají následující standardní geometrie. Úhel čela se volí v rozmezí $18 \div 12^\circ$ a úhel hřbetu $8 \div 6^\circ$. Pokud se dělí kotoučovou pilou specifický materiál (například v hromadné výrobě) doporučuje se použít řeznou geometrii vhodnou pro řezaný materiál [8].

Výroba pilových kotoučů z HSS

Prvním krokem je výběr materiálu těla kotouče. Existují dva materiály, které jsou díky svým vlastnostem upřednostňovány. Jedním z materiálů je wolfram-molybdenová rychlořezná ocel (DIN 1.3343 - Dmo5) s pěti procenty molybdenu, který podporuje vznik a tvorbu velmi jemné martenzitické struktury, zvyšující odolnost proti lomu. Wolfram zastoupený z 6,4 % tvoří tvrdé karbidy zvyšující tvrdost, a tím otěruvzdornost. Druhým používaným materiálem je wolfram-molybden-kobaltová rychlořezná ocel (DIN 1.3243 - Emo5), která se liší právě vyšším procentem kobaltu (5 %). Používá se převážně pro nástroje řezající těžkoobrobitelné a korozivzdorné oceli [9].

Pro vyřezání kotouče z tabule plechu daného materiálu se používají vysoce výkonné lasery, jejichž řízení je prováděno pomocí CNC programu. Výpalky následně putují na tepelné zpracování, které spočívá v kalení pro zvýšení tvrdosti s následným popouštěním k získání houževnatosti [10].

Po tepelném zpracování se musí kotouče narovnat a boky nástroje se brousí, případně leští, aby měl povrch nízkou drsnost a nedocházelo k přílišnému ulpívání materiálu na bocích kotouče. Poslední dvě operace jsou broušení geometrie a případná povrchová úprava nástroje. Hlavní dvě vlastnosti, které se požadují po těchto úpravách, jsou zvýšit tvrdost a snížit koeficient frikce. Jelikož je nástrojový materiál rychlořezná ocel, používá se PVD (fyzikální metoda povlakování) metoda povlakování [9,11].

Pro kotoučové pily se jako základní PVD povlaky a povrchové úpravy nabízejí především následující:

- **VAPO [pasivace]**

Povrchová úprava kotouče spočívá v popuštění pil v přehřáté páře při 550°C a oxidací plynem CO_2 . Při tomto procesu se na povrchu vytvoří oxidační vrstva s tvrdostí 900 HV. Při tomto procesu získá kotouč mimo povrchovou vrstvu také vyšší pružnost, z důvodu uvolnění pnutí, což potlačuje riziko zalomení pily. V povrchu jsou distribuovány póry, které lépe rozvádějí procesní kapalinu. Používá se jako prevence před korozí a pro snížení tření na bocích kotouče [8,12].

- **GRAYSKIN [CrN]**

Povlak používaný především pro řezání neželezných kovů (slitiny hliníku, mosazi, bronzy). Tyto materiály jsou známy svojí vysokou adhezí k nástroji při obrábění, proto povlak disponuje s relativně nízkým koeficientem tření ($\mu = 0,3$). Lze vytvářet povlaky tloušťky až $7\text{ }\mu\text{m}$ s tvrdostí do 1 800 HV [8,12,13].

- **GOLDSKIN [TiN]**

Nejběžněji používaný povlak, který zaručuje vysokou mikrotvrdost až 2 800 HV, což snižuje náchylnost na abrazivní opotřebení. S tímto povlakem je možné zvýšit řezné podmínky o 50 % a tím zkrátit pracovní časy. Používá se pro dělení středně legovaných ocelí [8,12,13].

- **SPEEDSKIN [Ti-C-N]**

Povlak s nízkým koeficientem tření ($\mu = 0,2$), potlačující vznik nárůstků i při obrábění vysokými reznými rychlostmi (až o 100 % vyšší, než u nepovlakovaného nástroje). Pro obrábění materiálů, jako jsou tvrdé oceli, měď, mosaz a další materiály se sklonem ke studenému navařování na nástroj [8,12,13].

- **BLACKSKIN [Ti-Al-N]**

Výborná odolnost při vysokých teplotách řezání, proto se dá použít u suchého obrábění nebo u obrábění s nedostatečným chlazením. Pro řezání materiálů s vysokou pevností v tahu, otěruvzdorných materiálů nebo litin [13].

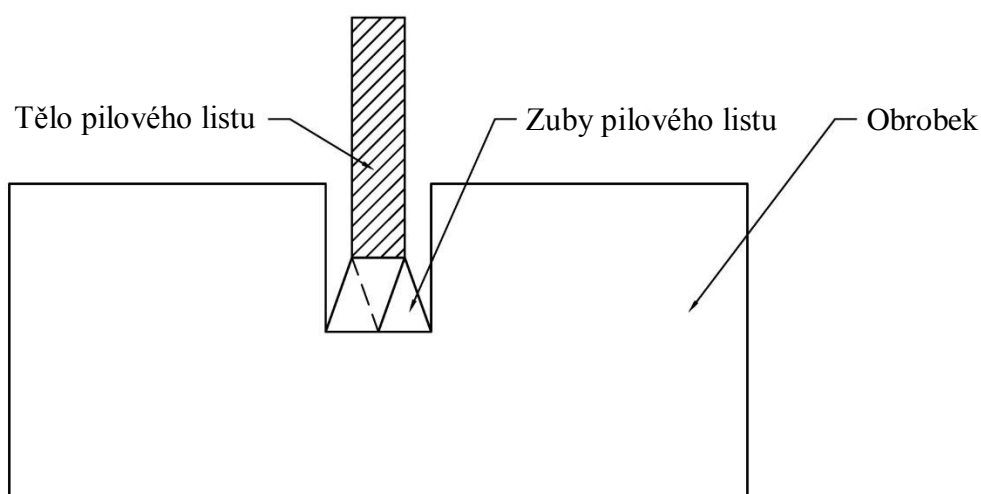
1.1.2 Dělení materiálu pomocí rámové pily

Pilový list (obr. 1.4) koná hlavní rezný pohyb přímočarý vratný (vyvozený klikovým mechanismem), při kterém v jednom směru odebírá materiál ve formě třísek. Ve směru druhém se realizuje pohyb vratný, a nastávají tzv. „mrtvé časy“, kdy nástroj neodebírá materiál. U stroje je zpětný chod doprovázen nadzvednutím listu, aby nedocházelo ke tření hřbetů zubů po materiálu, a s tím spojeným rychlejším opotřebováváním nástroje. Pilový list se používá, jak pro strojní – rámová pila, tak pro ruční dělení materiálu, přičemž může mít ozubení pouze na jedné nebo obou stranách listu. V obou způsobech je upnut v rámu. Pilové listy se dle použití vyrábějí pro strojní zařízení z rychlořezné oceli a pro ruční práce z oceli nástrojové [3,4].



Obr. 1.4 Pilový list KMITOS [14].

Zuby pilového pásu jsou rozvedeny do stran (obr. 1.5), je to z důvodu, aby se jejich boky neodíraly o vytvořenou reznou spáru.



Obr. 1.5 Rozvor zubů [15].

Nesprávné zacházení s pilovými listy se rychle projevuje především následujícími závadami a nedostatky [16]:

- a) Rychlé otupení - při nedostatečném přitlaku pilového listu k materiálu, se zuby pouze třou po povrchu a nezařezávají se.
- b) Vylamování zubů - při řezání tenkých obrobků nebo ostrých hran, kdy nejsou v záběru alespoň tři zuby najednou.
- c) Zlomení pásu - vzpříčení obrobku při dokončování řezu, špatně napnutý pás.
- d) Křivý řez - nedostatečné upnutí jak nástroje, tak obrobku, tvrdá místa v materiálu.

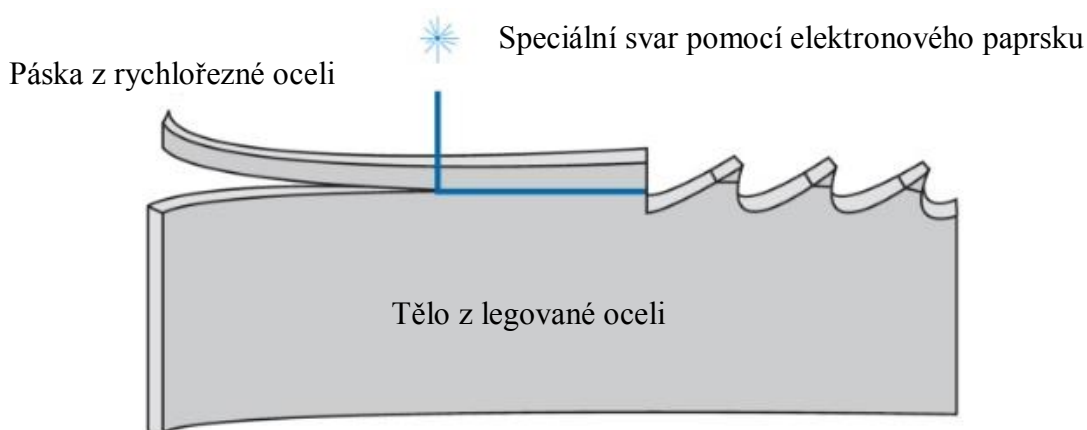
1.1.3 Dělení materiálu pomocí pásové pily

V průmyslových podnicích je tento způsob dělení naprostým standardem. Nekonečný pilový pás, který se pájí nebo svařuje na požadovanou délku, je veden do řezu přes napínací a hnací kotouč ve vertikálním nebo horizontálním směru. Při dělení dochází vzhledem k malé tloušťce pásu k velmi malým ztrátám prořezem, čehož se využívá při obrábění drahých materiálů [4,5].

Pro řezání železných materiálů se používají především dva druhy pásů:

a) Bimetalové pásy

Používají se za účelem snížení ceny nástroje. Tělo je tvořeno z pružinové oceli, na kterou je navařen (pomocí elektronového paprsku) pásek z RO (rychlořezné oceli) (obr 1.6). Do pásu jsou následně vyfrézovány zuby s požadovanou geometrií a z RO jsou zhotoveny pouze špičky zubů. Pás se kalí a ostří dosáhne vysokou tvrdost, zatímco tělo nástroje zůstává pružné a ohebné [4,5,17].

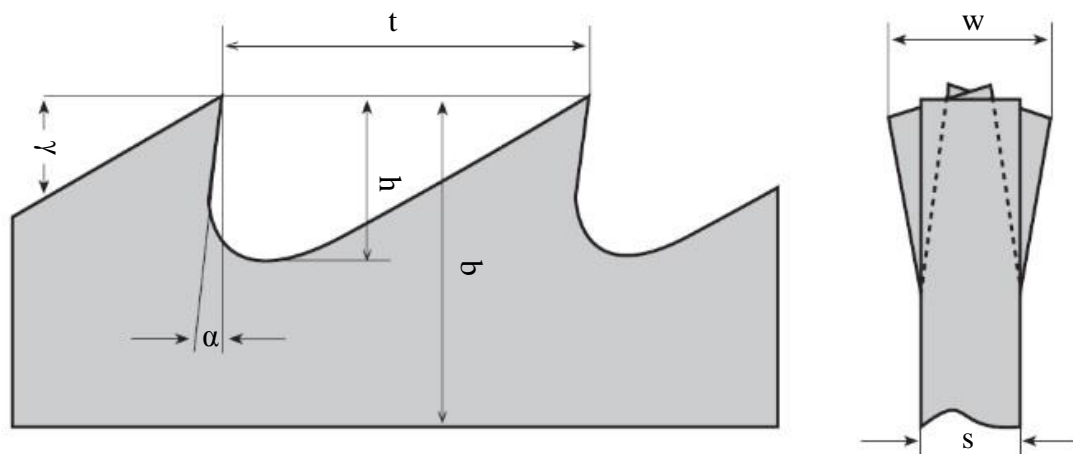


Obr. 1.6 Výroba bimetalového pásu [17].

b) Pásy z nástrojové oceli

Jedná se o nástrojové uhlíkové oceli s velmi jemným rozložením karbidických zrn. Břity zubů jsou vysokofrekvenčně kaleny a následně popuštěny [5].

Jsou tři parametry, které je vhodné při výběru pilového pásu volit s patřičnou rozvahou. Prvním je samotná geometrie zubu (obr. 1.7), kdy se podle řezaného materiálu volí úhel čela a hřbetu nástroje. Druhým parametrem je rozvod zubů (obr. 1.8), který je nezbytný pro eliminaci tření boků pásu v řezné spáře. Rozvod zubů zajišťuje větší šířku řezu, než je tloušťka pásu. Nejčastěji používaným je skupinový rozvod. Nakonec je vhodné volit zubovou rozteč, která se mění podle charakteru obrobku. Při řezání velkých průměrů se používá hrubá rozteč, a naopak pro menší průměry rozteč malá. Volba rozteče by měla být taková, aby platilo nepsané pravidlo záběru minimálně dvou zubů současně [18,19].



b – šířka pásu
s – tloušťka pásu
h – výška zubu

t – rozteč zubu
 α – úhel čela
 γ – úhel hřbetu

w – šířka rozvodu

Obr. 1.7 Detail pilového pásu [18].



Standardní – rozvod pro pásy s konstantní roztečí



Variabilní – skupinový rozvod pro pásy s variabilní roztečí



Vlnitý – pro pásy s velmi jemnou roztečí



Variabilní progresivní – velikost rozvodu se v rámci jedné skupiny zubů mění

Obr. 1.8 Rozvody zubů pilových pásů [18].

Naposledním parametrem, který by neměl být při výběru pilového pásu opomíjen, je tvar zubů. Na následujících obrázcích (obr 1.9 až obr. 1.13) lze vidět základní tvary zubů.



Obr. 1.9 Standardní zub [20].

STANDARDNÍ ZUB (S)

S úhlem čela 0° je určen hlavně k řezání materiálů tvořící krátkou třísku nebo nástrojových ocelí. V zásadě pro obrobky malých průřezů (profily a tenkostěnné trubky) [20].



Obr. 1.10 Pozitivní zub [20].

POZITIVNÍ ZUB (K)

Pro materiály tvořící dlouhou třísku, převážně hlubokotažné a korozivzdorné oceli. Lze použít i pro řezání slitin jako Inconel, Hastelloy, nebo Nimonic. Polotovar vždy velkého průřezu [20].



Obr. 1.11 Mezerový zub [20].

MEZEROVÝ ZUB (L)

K řezání polotovarů velkých průřezů z materiálu tvořící drobnou třísku (šedá litina) [20].



Obr. 1.12 Profilový zub [20].

PROFILOVÝ ZUB (P)

Má pozitivní úhel čela. Pro řezání dutých profilů, úhelníků, nebo nosníků. Používá se při řezání, při kterém hrozí větší výskyt vibrací [20].



Obr. 1.13 Trapézový zub [20].

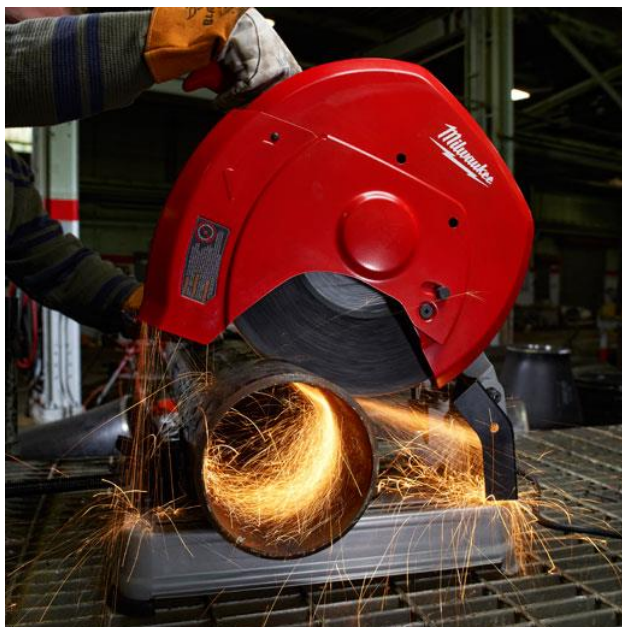
TRAPÉZOVÝ ZUB (T)

Toto provedení zubů nahrazuje rozvod pásu. Pás tvoří opakující se skupiny zubů s funkcí předřezávací, řezací a dořezávací [20].

1.1.4 Dělení materiálu rozbrušováním

Nástrojem je rozbrušovací kotouč o velmi malé tloušťce ($1\div 3$ mm), který produktivním způsobem dělí těžkoobrobitelné materiály, trubky, odstraňuje vtoky nebo nálitky z odlitků. Nevýhodou je velmi rychlé opotřebovávání kotouče, což vede ke zmenšování jeho průměru, proto je technologie vhodnější pro řezání menších průřezů [4].

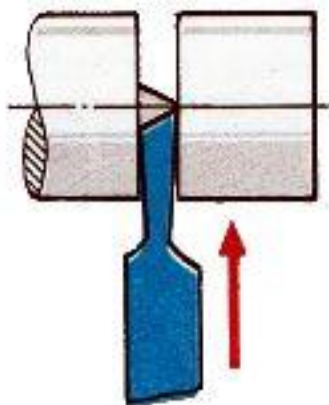
Rozbrušování (obr. 1.14) je velmi podobné broušení, vzniká při něm velké množství tepla, proto se nedoporučuje řezat samokalitelné materiály, nebo naopak materiály náchylné na popuštění. Nástrojovým materiálem může být umělý korund (Al_2O_3), polykrystalický diamant (PD), nebo kubický nitrid boru (KNB). Jako pojivo se používá pryž nebo pryskyřice [4].



Obr. 1.14 Dělení trubky rozbrušováním [21].

1.1.5 Dělení materiálu upichováním

Upichování (obr. 1.15) je jedna z mnoha operací, které se provádějí na soustruzích. Jde o dělení materiálu pomocí speciálního nástroje, kdy úběr materiálu je pouze ve směru kolmém na osu rotace. Nevýhodou této metody je relativně velká ztráta materiálu, která odpovídá šířce upichovacího nástroje a velikosti obrobku. Uplatnění se nachází především v automatizované výrobě, kdy se do vřetena upínají dlouhé tyče, které jsou postupně upichováním (zařazeným na konec každého obráběcího cyklu) rozděleny na jednotlivé hotové součástky.



Obr. 1.15 Schéma upichování [22].

1.1.6 Dělení materiálu stříháním a lámáním

Tyto dvě metody dělení jsou nenahraditelné v provozech zabývajících se hromadnou výrobou (válcovny, kovárny). Výhodou je, že při dělení nevzniká tříska, proto lze říct, že jsou bezodpadové.

- a) Stříhání - provádí se za tepla i studena,
- dělení tyčí, plechů a profilů.
- b) Lámání - provádí se pouze za studena,
- dělení tyčí.

1.1.7 Dělení materiálu třením

Používají se frikční pilové kotouče, pásy nebo dráty. Dělení třením se nejčastěji uplatňuje při dělení ocelových trubek, profilů a tenkostěnných obrobků. Materiálem kotoučů jsou chrom-vanadové oceli, které musí být tepelně zpracovány, pro dosažení optimálního poměru tvrdosti a houževnatosti. Kotouče mohou mít speciální ozubení (obr. 1.16), případně se používá zdrsňený nebo zcela hladký povrch [4,23].

Celý proces řezání spočívá v ohřívání materiálu na vysoké teploty vlivem třecích sil a vysokých hodnot řezné rychlosti ($v_c = 60 \div 150 \text{ ms}^{-1}$), což zapříčiňuje změknutí povrchové vrstvy materiálu v místě styku a jeho snadnějšímu oddělení [4,23].

Stejně jako u dělení rozbrušováním jsou předností úzký a přesný řez, s tím rozdílem, že nástroj nepodléhá takovému tepelnému zatížení a vydrží déle [4,23].



Obr. 1.16 Frikční kotouč [23].

1.2 Nekonenční technologie dělení materiálu

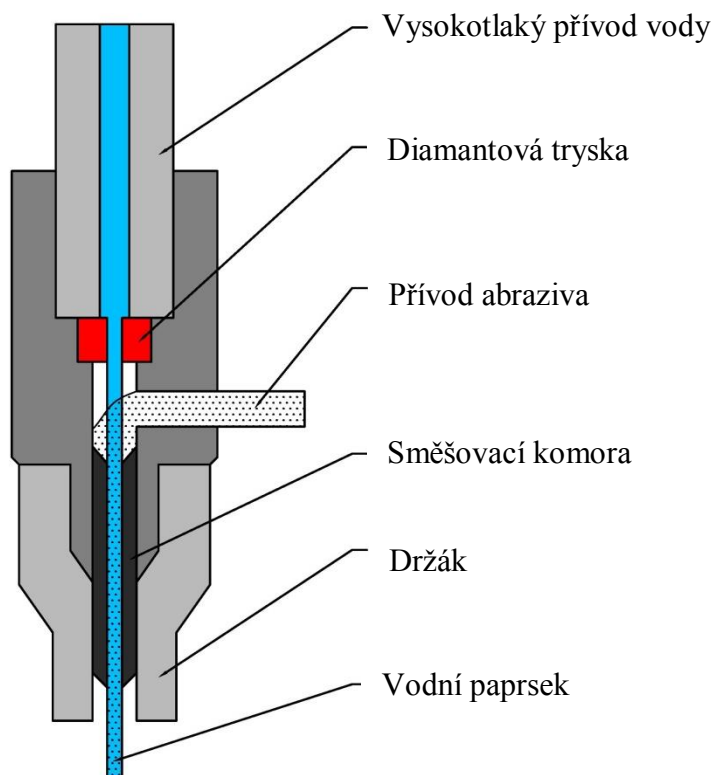
Vzhledem k tomu, že postupem času se vyvíjí stále nové materiály, které posouvají hranice dále, je logické na tuto změnu odpovídat novými metodami obrábění, které zajišťují produktivnější a tím i ekonomičtější proces změny polotovaru na hotový výrobek.

Jak už bylo řečeno, nekonvenční technologie využívají chemické, či fyzikální zákonitosti k tomu, aby bez vzniku třísky odebíraly materiál. Používají se pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů (superslitiny, titanové slitiny), kdy to konvenčními metodami nelze nebo je ekonomicky nevýhodné.

1.2.1 Dělení materiálu vodním paprskem

Pracovním médiem je voda o vysoké kinetické energii ($v = 600\div 900 \text{ ms}^{-1}$) a tlaku (až 700 MPa), vycházející z trysky. Materiál je následně odebírán pomocí vodní eroze soustředěné na jedno místo. Příměsí abraziva (olivín, granát, umělý korund) do vodního paprsku (obr. 1.17) lze výrazně zvýšit výkon řezání a řezat ocel o tloušťce přesahující 30 mm [4,24].

Celé zařízení je ovládáno pomocí CNC systému. Při dělení materiálu nevzniká tepelně ovlivněná oblast a vlivem úzkého řezu ($0,75\div 2,5 \text{ mm}$) jsou ztráty materiálu velmi malé. Nevýhodou je velká pořizovací cena zařízení a možnosti vzniku koroze u kovových materiálů, což je ale snahou omezit, či úplně odstranit. Možností použití je celá řada, od řezání zmrzlých potravin, přes dělení výbušných látek, až po řezání SK (slnutých karbidů) nebo titanu [4,24].



Obr. 1.17 Schéma řezání vodním paprskem [25].

1.2.2 Dělení materiálu laserem

K dělení materiálu laserem dochází díky působení úzkého paprsku monochromatického světla zaostřeného na velmi malou plochu. V místě dopadu se světelná energie mění na tepelnou a dochází k natavení, či odpaření materiálu. Výhodnější je použít variantu natavení materiálu, protože stačí vnést menší energii a bude dostačovat laserové zařízení o menším výkonu. Do místa řezu se dle použité technologie přivádí buď inertní, nebo řezný plyn. Kyslík, používaný jako řezný plyn má dvě funkce. Zajišťuje exotermickou reakci při spalování základního materiálu a tím dodává přídavné teplo, ale především vyfukuje natavený materiál z místa řezu. Dusík, který je jako inertní plyn používaný nejčastěji, má za úkol při tavném dělení materiálu odstraňování taveniny z řezné spáry [24,26,27].

Pro technologii řezání materiálu se používají tři hlavní skupiny laserů [27]:

- Nd: YAG lasery,
- CO₂ lasery,
- vláknové lasery.

Volba skupiny závisí na konkrétním použití, tzn. druhu řezaného materiálu, jeho tloušťce, geometrii a kvalitě výsledného řezu. Ve většině případu se však při výběru laseru dostáváme ke kompromisu mezi zmiňovanými vlastnostmi [27].

Nd: YAG lasery

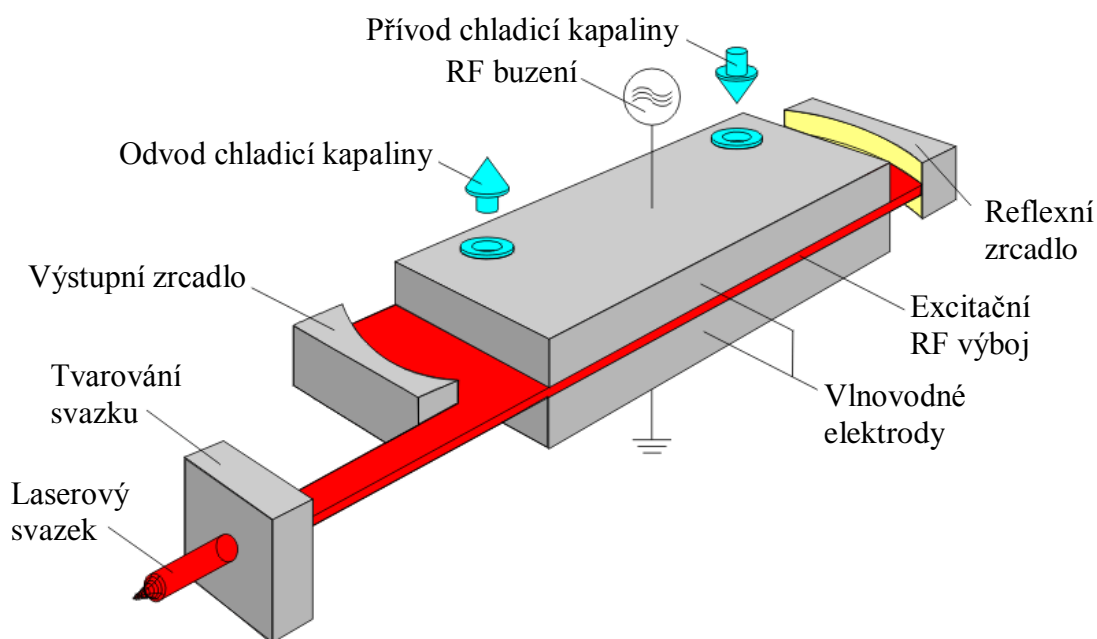
Pevnolátkový laser, jehož základem je yttrium-aluminiový granát. V optickém rezonátoru (trubice obklopená odrazovými plochami) se nachází výbojky (v dnešní době nahrazeny diodami). Dutina rezonátoru je volena tak, aby se co nejvíce světla z výbojek odrazilo na krystal [27].

Laserový svazek vycházející z rezonátoru je veden tubusem k optice, která je tvořena soustavou prvků pro fokusaci a hranolem pro změnu směru paprsku [27].

Nd: YAG lasery mají velmi malou účinnost. Proto je zapotřebí velký zdroj energie, přičemž většina energie je přeměňována na teplo ještě v aktivním prostředí, z čehož vyplývají vysoké nároky na chlazení [27].

CO₂ lasery

Vzhledem ke své výkonnosti jsou v technické praxi nejpoužívanější. Typický výkon laserů používaných pro řezání se pohybuje v rozmezí 500÷2 000 W. Aktivním médiem je směs plynu CO₂, N₂ a He, která převádí elektrickou energii ve formě výboje v dutině laseru na světelné záření. CO₂ lasery (obr. 1.18) se pro řezání používají v kontinuálním režimu, který je rychlejší. Existují ale dva režimy, ve kterých lze laser provozovat. Druhý, pulzní režim naopak dosahuje lepší kvalitu řezu, protože vysoký špičkový výkon v krátkých časových úsecích zaručí účinný ohřev, mezitím, co průměrný výkon zpomaluje proces řezání a poskytuje dostatečnou prodlevu pro odstranění nataveného materiálu z místa řezu [27].

Obr. 1.18 Schéma CO₂ laseru [28].

Vláknové lasery

Ke generování záření dochází v jádru optického vlákna, které je dopované prvky vzácných zemin, nejčastěji erbiem, či ytterbiem. Optické vlákno zastává stejnou funkci, jako krystal u laserů pevnolátkových, protože se v něm vytváří laserový paprsek a vlákno funguje jako optický zesilovač. Vláknem, které může být i několik metrů dlouhé, je po celé jeho délce chlazeno vzduchem, tzn. teplo je odváděno velkou plochou, a proto není potřeba používat aktivní chlazení [29,30].

Vláknem se dělí na středovou část (dopované aktivní vlákno) a obalovou část (nízkovýkonným laserovým paprskem budí vnitřní vlákno). V aktivním vláknu jsou Braggovské mřížky, což jsou struktury vytvořené přímo na jeho jádře. Mřížky mění index lomu a tím tvoří jakási zrcátka, která odrážejí pouze danou vlnovou délku optického záření [30].

Mezi výhody toho laseru patří dobrá kvalita paprsku s vysokou intenzitou záření a dlouhá životnost (150 000 hodin) [30].

Metody řezání laserem

a) Sublimační řezání

Při této metodě se materiál zahřeje pomocí pulsního laserového svazku na teplotu varu, kdy dochází k odpaření materiálu. Je nutné řezat s vysokou hustotou energie, aby se minimalizovala tavná zóna. Pulsní režim je důležitý pro odchod par při sublimaci materiálu mezi pulzy, nebo jsou páry odstraněny proudem inertního plynu. Rychlost řezání je přímo úměrná rychlosti proudění inertního plynu a nepřímo úměrná odpařovacímu teplu materiálu. Používá se především pro řezání tenkých plechů a minerálů [31,32].

b) Tavné řezání

Materiál se kontinuálním laserovým svazkem ohřívá na teplotu tavení. Do místa natavení se přivádí inertní plyn, nejčastěji N_2 , který taveninu vyfoukne z místa řezu a na vlastním procesu řezání se nepodílí. Plyn je přiváděn pod vysokým tlakem, aby zabránil ulpívání taveniny na spodní hraně řezu. Povrch řezné spáry je kovově lesklý bez známek oxidace. Proces řezání je relativně pomalý. Používá se pro vysokolegované (korozi-vzdorné) oceli, slitiny niklu, hliníku a některé nekovové materiály, jako jsou keramika nebo dřevo [31,32].

c) Oxidační řezání

Do místa řezu je přiváděn plyn, který se přímo podílí na procesu řezání. Aktivním plynem je kyslík, který s řezaným materiálem vytváří exotermickou reakci, probíhající při zápalné teplotě materiálu. U řezání konstrukčních ocelí se dosahuje vysoké rychlosti řezání, za cenu horší kvality řezu, s vyšší drsností a větším pásmem teplotně ovlivněné oblasti. Lze pracovat jak v kontinuálním, tak pulzním režimu, kdy mezi pulzy nenastává exotermická reakce a materiál v řezné mezeře má dostatek času na zchladnutí. Tímto způsobem se řezou nelegované až středně legované oceli, protože u nich kyslík nezpůsobuje výraznou oxidaci řezných hran, ale pouze tenkou oxidickou vrstvu na ploše řezné spáry [31,32].

1.2.3 Dělení materiálu elektronovým paprskem

Tepelná energie potřebná k řezání materiálu je získávána z dopadu elektronů o vysoké kinetické energii na povrch obrobku. Paprsek vniká do materiálu, který se zahřeje nad teplotu tavení a dochází k jeho kontinuálnímu odpařování [24,33].

Základem zařízení jsou elektronová děla, která generují, urychlují a zaostřují elektronový svazek, uvolněný ze žhavené wolframové katody. Proud elektronů je pomocí anody urychlen na rychlost rovnající se cca dvěma třetinám rychlosti světla. Svazek je zaostřován pomocí elektromagnetické čočky na velmi malou plochu. Vychýlení je zabezpečováno systémem pracujícím na elektromagnetickém principu [24,33].

Elektronový paprsek se používá pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů (žárupevné materiály, titanové slitiny), protože obrobitelnost se neodvíjí od mechanických vlastností materiálu, ale fyzikálních. Tato metoda je hojně využívána i při svařování nebo vrtání děr (pomocí pulzního pracovního režimu). U obrábění/řezání se spíše používá laser, protože není potřeba mít vakuovou komoru [24,33].

1.2.4 Elektroerozivní řezání

Pod tímto označením se uvažuje řezání drátovou elektrodou o průměru $0,03 \div 0,35$ mm, které se uplatňuje při dělení velmi tvrdých materiálů a výrobě lisovacích nebo střížných nástrojů. Metoda dovoluje vyrábět pouze plochy mající jako tvořící křivku přímku. Drátové elektrody bývají z mosazi nebo molybdenu [34].

Drát je napínán soustavou kladek a kontinuálně odvíjen do místa řezu, aby nedošlo k jeho místnímu opotřebení. Mezi obrobkem a nástrojem, na který je přivedeno elektrické napětí, dochází k elektrickému výboji způsobujícímu odtavení materiálu obrobku. Tavenina je odplavena z místa řezu cirkulujícím dielektrikem [34,35,36].

Dosahované drsnosti řezu jsou až $Ra = 0,2 \mu m$, omezení metody spočívá v možnosti obrábět pouze vodivé materiály [35,36].

1.2.5 Dělení materiálu plazmou

Díky své vysoké rychlosti řezání, malému tepelnému ovlivnění materiálu, nebo univerzálnosti při dělení širokého spektra železných i neželezných materiálů, se řezání plazmou za poslední dvacet let dramaticky rozrostlo, především na úkor známějších metod, jako je řezání kyslíkem [27].

Zdrojem tepla je hořící elektrický oblouk mezi wolframovou katodou a anodou, kterou může být těleso hořáku nebo obráběný materiál. Materiál je ohřátý na tavicí teplotu a odstraňován pomocí ionizovaného plynu o velké průtokové rychlosti [27].

Řezání plazmou se rozděluje dle použitých stabilizátorů elektrického oblouku. Mohou to být argon, vodík, dusík, při řezání však nejčastěji stlačený vzduch. Použitím vzduchu, jako stabilizačního plynu si můžeme dovolit zvýšit jeho průtok, bez výrazné ekonomické zátěže, a tím zvýšit rychlost řezání. Se stabilizací vzduchem lze také dosáhnout užší řeznou spáru nebo zvýšit jakost jejího povrchu, ačkoli rozměrová přesnost odpovídá hrubovacím operacím [27].

Velmi častými technologiemi používajícími plazmu jsou svařování, navařování a nanášení funkčních a ochranných povlaků na materiál. Příkladem mohou být keramické nástriky vybraných leteckých součástí [27].

1.3 Kinematika řezání pilovým kotoučem

Pilový kotouč lze na základě charakteru obrábění také pochopit jako válcovou frézu o velmi malé tloušťce, proto jsou jejich kinematika a tudíž i základní výpočty shodné. Jedná se o vícebřitý nástroj, se zuby pouze po obvodě. Hlavní řezný pohyb – rotační, koná kotouč, vedlejší řezné pohyby koná obrobek upnutý na pracovním stole stroje. Hlavní řezný pohyb je charakterizován pomocí řezné rychlosti v_c , dle vzorce (1.1)

Vztah pro výpočet řezné rychlosti v_c (1.1) [37].

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1\,000} [m \cdot min^{-1}] \quad (1.1)$$

kde: $v_c [m \cdot min^{-1}]$ - řezná rychlost,
 $D [mm]$ - průměr nástroje,
 $n [min^{-1}]$ - otáčky nástroje.

Vedlejší řezný pohyb se udává ve většině případů jako posuv na zub f_z , vzorec (1.2), nebo jako hodnota posuvové rychlosti (posuv za minutu) v_f , vzorec (1.3). Vektorovým součtem posuvové rychlosti a řezné rychlosti dle vzorce (1.4) následně dostáváme hodnotu rychlosti řezného pohybu v_e .

Vztah pro výpočet **posuvu na zub** f_z (1.2) [37].

$$f_z = \frac{v_f}{n \cdot z} \text{ [mm]} \quad (1.2)$$

kde: f_z [mm] - posuv na zub,
 v_f [mm.min⁻¹] - posuvová rychlost (posuv za minutu),
 n [min⁻¹] - otáčky nástroje,
 z [-] - počet zubů nástroje.

Vztah pro výpočet **posuvové rychlosti** (posuv za minutu) v_f (1.3) [37].

$$v_f = n \cdot z \cdot f_z \text{ [mm.min}^{-1}\text{]} \quad (1.3)$$

kde: v_f [mm.min⁻¹] - posuvová rychlost (posuv za minutu),
 n [min⁻¹] - otáčky nástroje,
 z [-] - počet břitů nástroje,
 f_z [mm] - posuv na zub.

Vztah pro výpočet **rychlosti řezného pohybu** v_e (1.4) [37].

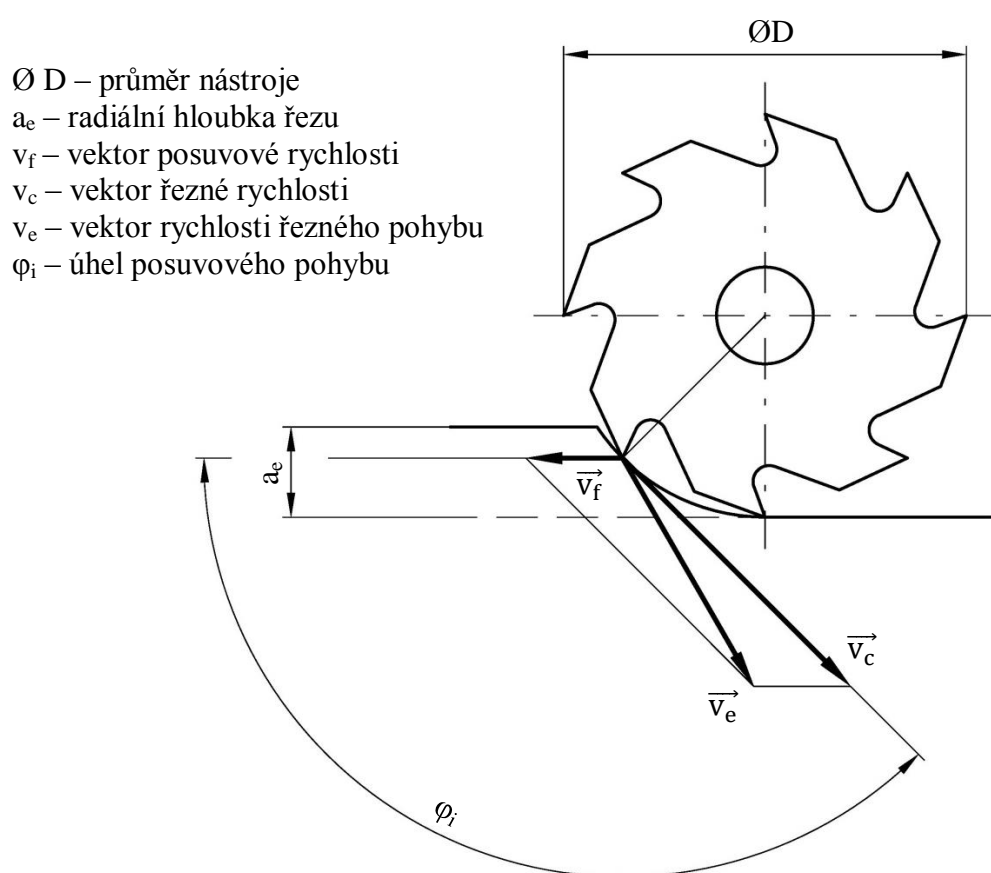
$$v_e = \sqrt{v_c^2 + (v_f \cdot 10^{-3})^2} \text{ [m.min}^{-1}\text{]} \quad (1.4)$$

kde: v_e [m.min⁻¹] - rychlost řezného pohybu,
 v_c [m.min⁻¹] - řezná rychlost,
 v_f [mm.min⁻¹] - posuvová rychlost (posuv za minutu).

Stejně jako válcové frézování jde i řezání pilovým kotoučem rozdělit na metodu souslednou (obr. 1.19) a nesouslednou (obr. 1.20).

a) **Sousledné obrábění**

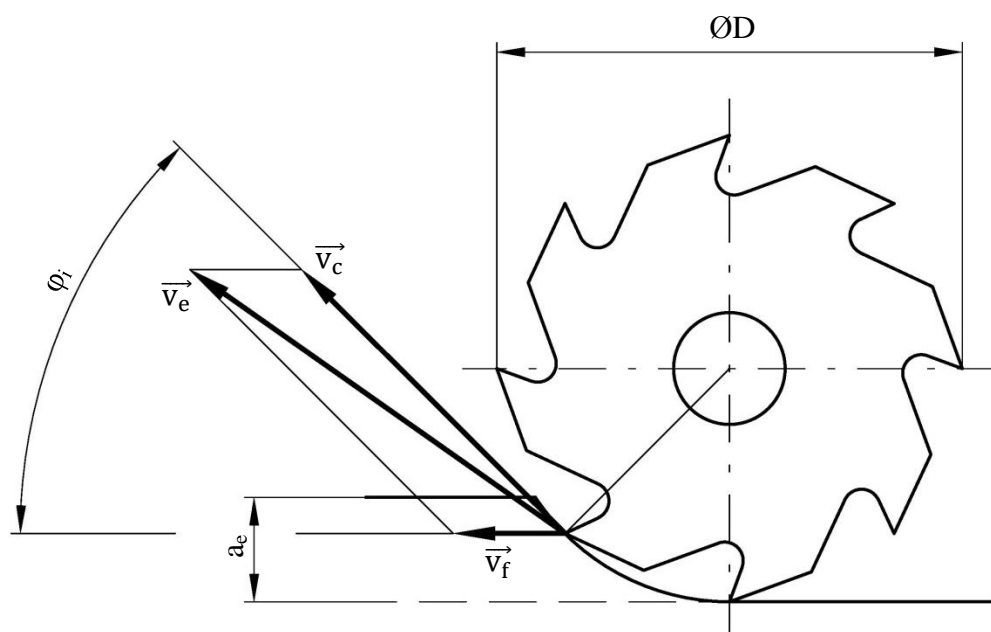
Nástroj se otáčí ve stejném směru, jako je posuv obrobku. Maximální tloušťka třísky nastává v okamžiku vniknutí zubu pilového kotouče do materiálu. Průřez třísky se následně postupně zmenšuje s otáčením nástroje. Při vnikání zubu nástroje do materiálu vznikají silové rázy, které lze potlačit použitím šikmého ozubení. Řezná síla vznikající při obrábění směřuje do stolu stroje, takže jsou menší nároky na upínání obrobků. Dalšími výhodami jsou menší sklon ke kmitání a tvorbě nárůstku [38].



Obr. 1.19 Sousedné frézování [26].

b) Nesousedné obrábění

Nástroj se otáčí proti směru posuvu obrobku. Na rozdíl od sousledné metody obrábění je maximální průřez třísky v momentu výjezdu nástroje ze záběru. Nástroj tedy zajíždí do materiálu a na začátku záběru se snaží oddělovat třísku nulové tloušťky, což není reálné, proto dochází k oddělování třísky až po určitém skluzu zubu nástroje po obrobené ploše. Vlivem tohoto skluzu má obrobená plocha horší kvalitu, než u sousledného obrábění a nástroj je rychleji opotřebováván. Proces je doprovázen také zvýšenou tvorbou nárůstků, kvůli vyšším teplotám při výjezdu zubu pilového kotouče z řezu [38].



Obr. 1.20 Nesousledné frézování [26].

1.3.1 Výpočet průřezu třísky při řezání pilovým kotoučem

Jak už bylo nastíněno v předešlé kapitole, průřez třísky se v průběhu záběru zubu v materiálu mění. Při řezání kotoučovou pilou je šířka záběru ostří a_p rovna šířce kotouče a je tedy konstantní. Mění se jmenovitá tloušťka třísky v závislosti na úhlu posuvového pohybu φ_i , jak je patrné z rovnice (1.6). Jmenovitý průřez třísky pro i -tý zub je popsán rovnicí (1.5).

Vztah pro výpočet **jmenovitého průřezu třísky i -tého zubu A_{Di}** (1.5) [37].

$$A_{Di} = a_p \cdot h_i \text{ [mm}^2\text{]} \quad (1.5)$$

kde: A_{Di} [mm²] - jmenovitý průřez třísky i -tého zubu,
 a_p [mm] - šířka záběru ostří (je rovna jmenovité šířce třísky),
 h_i [mm] - jmenovitá tloušťka třísky i -tého zubu.

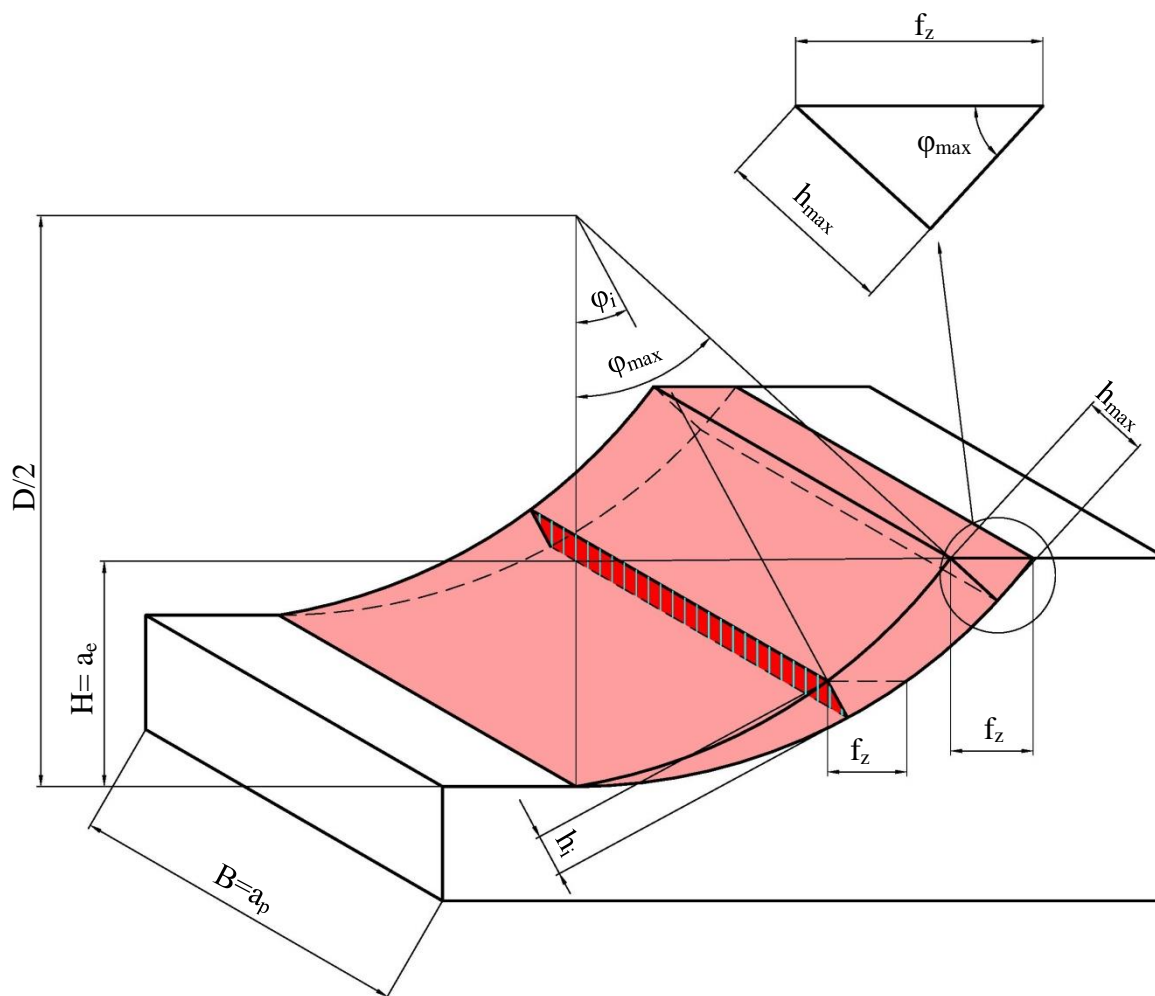
Vztah pro výpočet **jmenovité tloušťky třísky i -tého zubu h_i** v závislosti na úhlu posuvového pohybu (1.6) [37].

$$h_i = f_z \cdot \sin \varphi_i \text{ [mm]} \quad (1.6)$$

kde: h_i [mm] - jmenovitá tloušťka třísky i -tého zubu,
 φ_i [°] - úhel posuvového pohybu i -tého zubu,
 f_z [mm] - posuv na zub.

Dosazením rovnice (1.6) do rovnice (1.5) je vyjádřen výsledný vztah pro výpočet **jmenovitého průřezu třísky i-tého zubu A_{Di}** (1.7).

$$A_{Di} = a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_i \text{ [mm}^2\text{]} \quad (1.7)$$



Obr. 1.21 Průřez třísky při řezání kotoučovou pilou [26].

Dle obr. 1.21 a vzorců (1.5) a (1.6) je možné sestavit rovnice (1.8) až (1.11) pro získání maximální velikosti jmenovitého průřezu třísky A_{Dmax} (1.9), ze které lze vypočítat například maximální sílu F_{max} působící na zub nástroje.

Vztah pro výpočet **maximálního jmenovitého průřezu třísky A_{Dmax}** (1.8) [37].

$$A_{Dmax} = a_p \cdot h_{max} \text{ [mm}^2\text{]} \quad (1.8)$$

kde: A_{Dmax} [mm²] - maximální jmenovitý průřez třísky,
 a_p [mm] - šířka záběru ostří,
 h_{max} [mm] - maximální jmenovitá tloušťka třísky.

Vztah pro výpočet **maximální jmenovité tloušťky třísky** h_{\max} (1.9) sestavený na základě vyňatého pravoúhlého trojúhelníku z obr. 1.21. [37].

$$h_{\max} = \sin \varphi_{\max} \cdot f_z \text{ [mm]} \quad (1.9)$$

kde: h_{\max} [mm] - maximální jmenovitá tloušťka třísky,
 φ_{\max} [°] - maximální úhel posuvového pohybu,
 f_z [mm] - posuv na zub.

Dosazením rovnice (1.9) do rovnice (1.8) je vyjádřen výsledný vztah pro výpočet **maximálního jmenovitého průřezu třísky** $A_{D\max}$ (1.10).

$$A_{D\max} = a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_{\max} \text{ [mm}^2\text{]} \quad (1.10)$$

Na obr. 1.21 lze také najít druhý pravoúhlý trojúhelník, pomocí kterého sestavíme rovnici pro výpočet **maximální hodnoty úhlu posuvového pohybu** φ_{\max} (1.11) [37].

$$\varphi_{\max} = \arccos\left(\frac{\frac{D}{2} - a_e}{\frac{D}{2}}\right) = \arccos\left(\frac{D - 2 \cdot a_e}{D}\right) = \arccos\left(1 - \frac{2 \cdot a_e}{D}\right) \text{ [°]} \quad (1.11)$$

kde: φ_{\max} [°] - maximální úhel posuvového pohybu,
 a_e [mm] - radiální hloubka řezu,
 D [mm] - průměr nástroje.

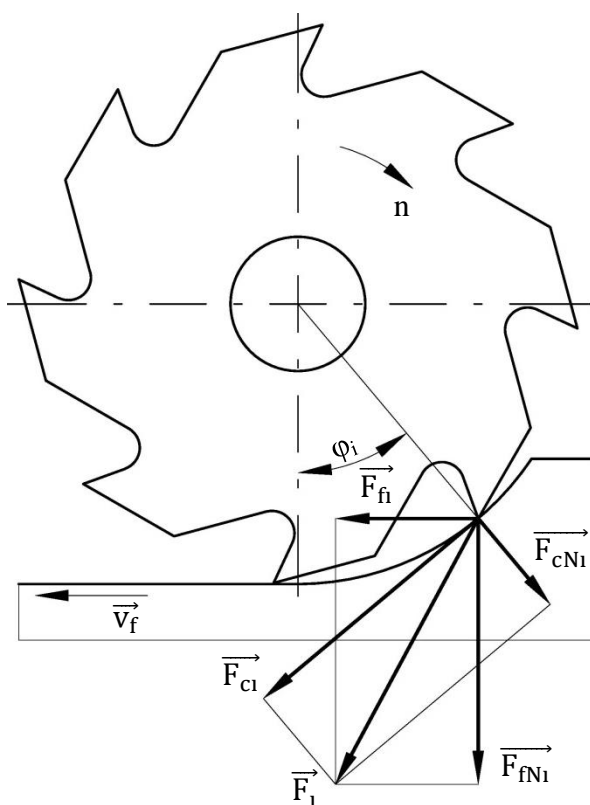
2 ANALÝZA SILOVÉHO ZATÍŽENÍ ŘEZÁNÍ TENKOSTĚNNÝCH SOUČÁSTÍ KOTOUČOVOU PILOU

Na úvod je nutné si uvědomit, že kotoučová pila je vícebřitý nástroj a celková síla je dána součtem jejích dílčích složek, působících na jednotlivé zuby v záběru. Zuby odebírají v závislosti na úhlu posuvového pohybu různé velké průřezy třísky (viz vztah (1.7)), a tím se mění i síla na ně působící. Velikost celkové síly působící na nástroj se odvíjí nejen od velikosti hodnoty jmenovitého průřezu třísky, ale ovlivňuje ji také počet zubů v záběru, nebo okamžitá poloha zubů frézy vůči obrobku [5].

Síly vznikající při obrábění mohou mít dvojí charakter. Mohou být statické, ty se obecně týkají průměrných hodnot řezných sil v závislosti na čase. Velikost statické síly se mění dle aktuální hodnoty tloušťky třísky. Síla se opakuje periodicky se zubovou frekvencí, při každé následující otáčce nástroje. Druhou silou, je síla dynamická, která vzniká při nestabilním obrábění, je generována periodickou změnou tloušťky na dráze mezi dvěma sousedními zuby frézy (kotoučové pily), nebo na obvodu obrobku při soustružení. Za předpokladu, že by byly řezné podmínky konstantní, jsou původci vzniku dynamické síly strukturální rozdíly v materiálu obrobku. Výpočty v této kapitole jsou uvažovány pro statickou řeznou sílu (2.5) [39,40].

2.1 Silové zatížení působící na jeden zub pily

Při stanovování vztahů pro výpočet řezné síly se vychází ze zatížení jednoho zubu frézy v obecné poloze. Na obr. 2.1 a obr. 2.2 lze vidět, jak se mění směry působení sil při sousledném a nesousledném způsobu obrábění.



Obr. 2.1 Rozklad sil při sousledném frézování [37].

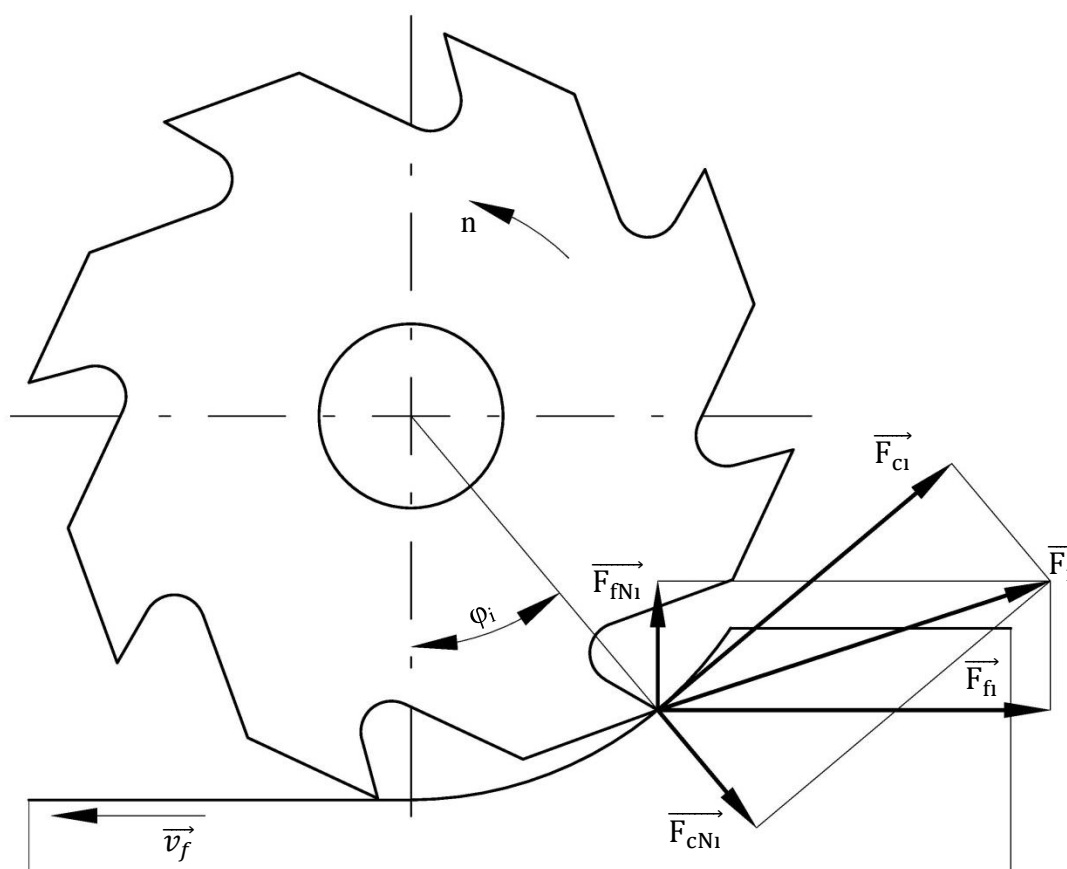
Při obrábění kotoučovou pilou se celková síla působící na i -tý zub F_i (dle obr. 2.1 a obr. 2.2 by platila rovnost $F_i = F$, protože je v záběru pouze jeden zub nástroje) rozkládá do složek:

F_{ci} – řezná síla působící na i -tý zub,

F_{cNi} – normálová řezná síla působící na i -tý zub,

F_{fi} – posuvová síla působící na i -tý zub,

F_{fNi} – normálová posuvová síla působící na i -tý zub.



Obr. 2.2 Rozklad sil při nesousledném frézování [17].

Při stejných řezných podmínkách je velikost celkové síly působící na nástroj, jak u sousledného, tak u nesousledného způsobu obrábění shodná. Mezi těmito dvěma variantami obrábění volíme v závislosti na použitém stroji, materiálu obrobku, polotovaru a vlastnostech soustavy stroj-nástroj-obrobek. Velkou nevýhodou nesousledného obrábění je velikost síly F_{fi} na obr. 2.2, která je rovnoběžná s vektorem pohybu stolu frézky. Tato síla klade větší nároky na servopohony, což může způsobovat rázy a chvění. Na obr. 2.1 lze vidět, že větší síla je F_{fNi} , která je zachycena konzolou stolu, což vede ke zvyšování kvality povrchu i trvanlivosti nástroje. Více je popsáno v kap. 1.3 [41].

Pro výpočet řezné síly je nutné znát tzv. měrnou řeznou sílu. Měrná řezná síla je definována, jako síla potřebná k překonání soudržnosti materiálu účinkem řezného procesu a je dána vztahem (2.1). Další uváděná interpretace ji popisuje jako sílu ve směru hlavního řezného pohybu, vztaženou na jednotkový průřez třísky [42].

Vztah pro stanovení **měrné řezné síly** k_{ci} působící na i-tý zub (2.1) [43].

$$k_{ci} = \frac{k_{c1.1}}{h_i^{m_c}} [MPa] \quad (2.1)$$

kde: k_{ci} [MPa] - měrná řezná síla působící na i-tý zub,
 $k_{c1.1}$ [MPa] - měrná řezná síla pro jednotkový průřez třísky ($A_D = 1 \text{ mm}^2$),
 h_i [mm] - jmenovitá tloušťka třísky t-tého zubu,
 m_c [-] - konstanta.

Dosažením vztahu (1.6) do rovnice (2.1) dostáváme vztah (2.2):

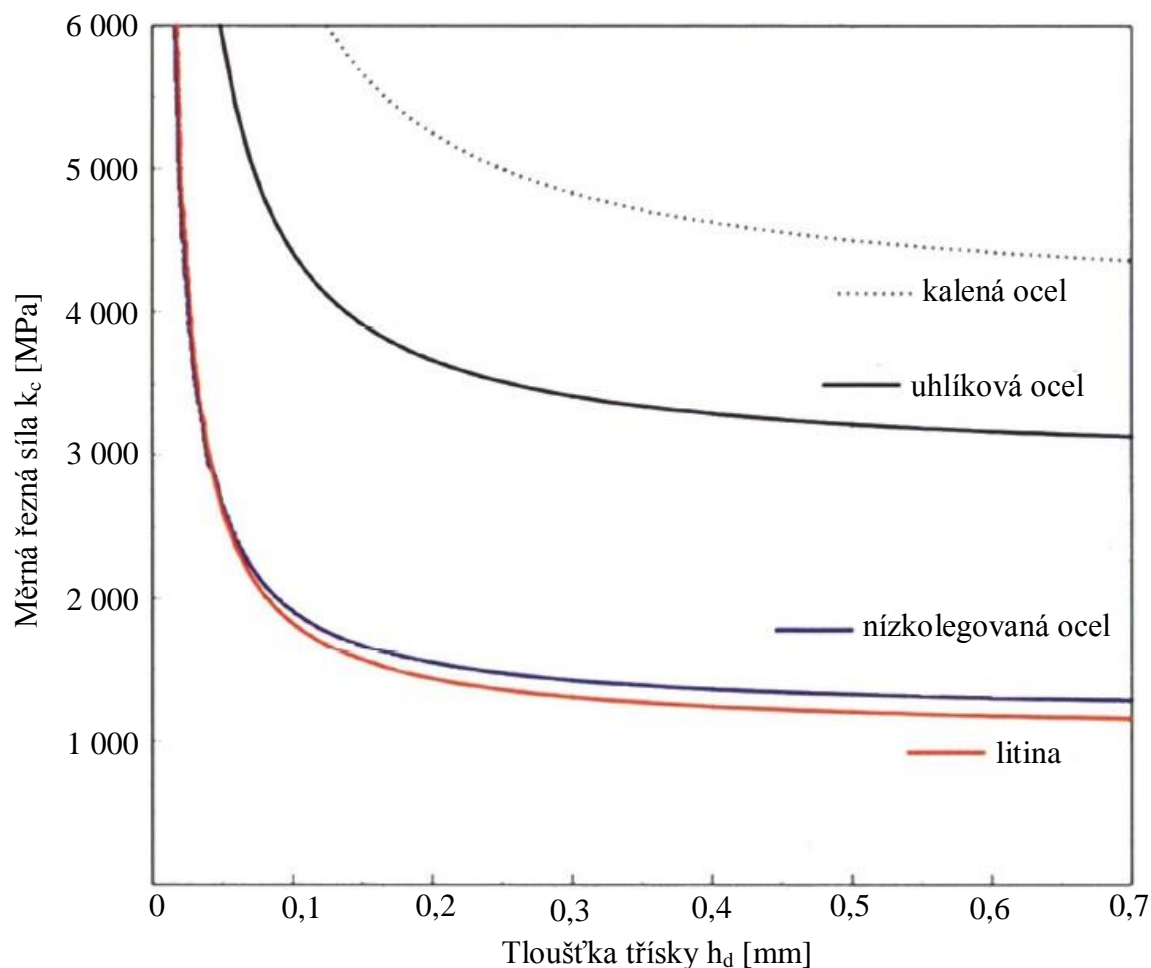
$$k_{ci} = \frac{k_{c1.1}}{(f_z \cdot \sin \varphi_i)^{m_c}} [MPa] \quad (2.2)$$

Hodnota koeficientů $k_{c1.1}$ a m_c se mění v závislosti na mechanických a fyzikálních vlastnostech materiálu (hodnoty pro vybrané materiály viz tab. 2.1). Koeficienty byly získány experimentálně při různých řezných podmínkách, pro různé technologické operace. Koeficienty berou v potaz i působení vnějších vlivů, jako jsou úhel čela nástroje, řezná rychlost a opotřebení nástroje [43,39].

Tab. 2.1 Tabulka měrných řezných sil pro vybrané materiály [42,44].

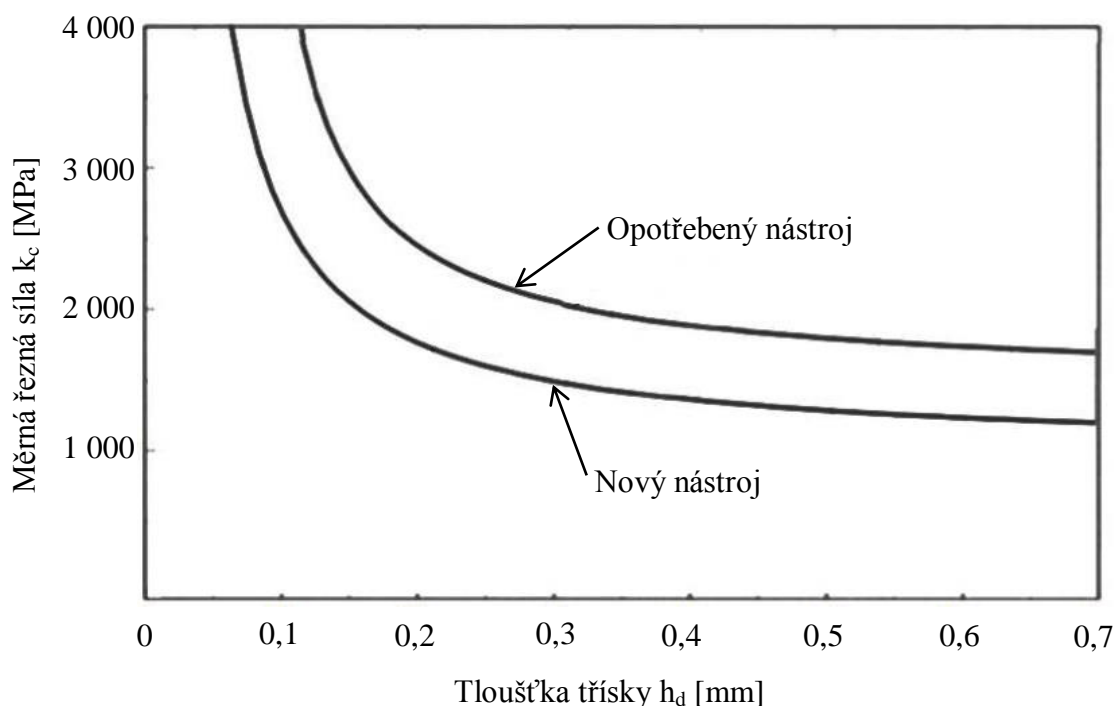
ISO	CMC	Materiál	Tvrdost	$k_{c1.1}$ [MPa]	m_c [-]
P	01.1	Nelegovaná ocel C=0,10÷0,25 %	125 HB	1 500	0,25
	01.2	Nelegovaná ocel C=0,25÷0,55 %	150 HB	1 600	0,25
	01.3	Nelegovaná ocel C=0,55÷0,80 %	170 HB	1 700	0,25
	02.2	Nízkolegovaná (legující prvky <5 %) ocel	300 HB	1 900	0,25
	03.13	Vysokolegovaná (legující prvky >5 %) ocel	200 HB	1 950	0,25
M	05.13	Feriticko-martenzitická korozivzdorná ocel	330 HB	2 350	0,21
	05.22	Austenitická precipitačně vytvrzená ocel	330 HB	2 850	0,21
	05.52	Duplexní ocel s obsahem C <0,05%	260 HB	2 450	0,21
K	07.2	Litina s vločkovým grafitem (temperovaná)	230 HB	900	0,28
	08.2	Litina s lupínkovým grafitem (šedá)	245 HB	1 100	0,28
	09.2	Perlitická nodulární litina	250 HB	1 350	0,28
N	30.12	Tvářené slitiny hliníku	100 HB	650	-
	30.22	Odlévané slitiny hliníku	90 HB	700	0,25
	30.42	Odlévané slitiny hliníku s 16÷22 % Si	130 HB	700	-
S	20.12	Žáruvzdorné slitiny na bázi železa	280 HB	2 500	0,25
	20.24	Žáruvzdorné slitiny na bázi niklu	320 HB	3 000	0,25
	20.33	Kobaltové slitiny	320 HB	3 100	0,25
H	04.1	Zušlechťená ocel	59 HRC	4 200	0,25
	10.1	Tvrzená litina	400 HB	2 250	0,28

Jak je ze vztahu (2.2) patrné, řezný odpor klesá s rostoucí tloušťkou třísky (obr. 2.3), je to dáno poklesem poměrné hodnoty deformační práce, protože se zmenšuje stupeň zpevnění materiálu i podíl pasivních prací na tvorbu třísky. Řezný odpor klesá i se zvyšující se teplotou, čehož se využívá například u vysokorychlostního obrábění (HSC) [26,39,40,43].



Obr. 2.3 Závislost měrné řezné síly na tloušťce třísky [39].

Během obrábění dochází jak k makroskopickým, tak mikroskopickým změnám nástroje, které jsou charakterizovány opotřebením nástroje. Se zvyšujícím se opotřebením se zvyšují i řezné síly působící na nástroj. Tato skutečnost je doprovázena mimo jiné nezanedbatelným nárůstem hodnot měrné řezné síly (obr. 2.4). Tento nárůst se sleduje především při testování nových nástrojů.



Obr. 2.4 Vliv opotřeбенí nástroje na velikost měrné řezné síly [39].

V literatuře [40] je naznačen odlišný způsob výpočtu měrné řezné síly, kdy její výpočet vychází z popisu zatížení a spotřeby energie na čelní ploše nástroje, a současně bere v úvahu i spotřebu energie na hřbetní ploše, která se mění v závislosti na zvětšující se šířce fazetky opotřeбенí na hřbetě nástroje.

Pro shrnutí lze z předešlých výpočtů a obrázků konstatovat, že velikost měrného řezného odporu je určena [42]:

- tvrdostí a pevností materiálu obrobku (hodnota $k_{cl.1}$),
- hodnotou jmenovitého průřezu třísky (především tloušťky třísky),
- geometrií nástroje (její změnou při opotřeбенí),
- aktuální polohou zubu nástroje (úhel posuvového pohybu),
- teplotou řezání (s vyšší teplotou klesá řezný odpor materiálu),
- řezným prostředím.

Řezná síla i -tého zubu je dána součinem jmenovitého průřezu třísky a měrnou řeznou silou podle vztahu (2.3).

Vztah pro stanovení **řezné síly** F_{ci} působící na i -tý zub (2.3) [5,26,43].

$$F_{ci} = k_{ci} \cdot A_{Di} \text{ [N]} \quad (2.3)$$

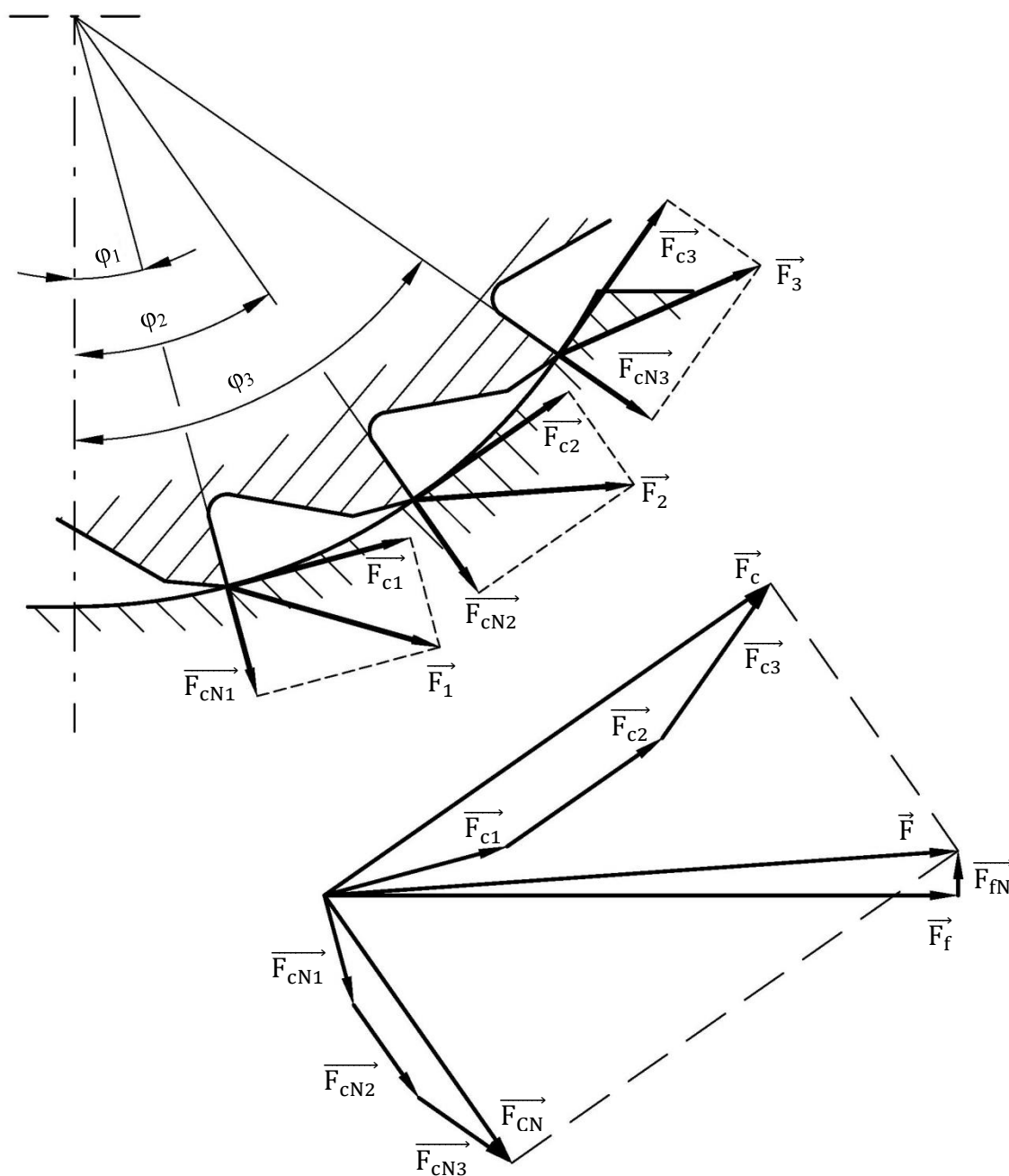
- kde:
- | | | |
|-----------------------------|---|---|
| F_{ci} [N] | - | řezná síla působící na i -tý zub, |
| k_{ci} [MPa] | - | měrná řezná síla působící na i -tý zub, |
| A_{Di} [mm ²] | - | jmenovitý průřez třísky i -tého zubu. |

Následným dosazením rovnic (2.2) a (1.7) do vztahu (2.3) a jednoduchým matematickým úpravám dostáváme konečnou rovnici (2.4) [5,26,43].

$$F_{ci} = k_{c1.1} \cdot a_p \cdot f_z^{1-m_c} \cdot (\sin \varphi_i)^{1-m_c} [N] \quad (2.4)$$

2.2 Celková řezná síla pro všechny zuby v záběru

Jak již bylo řečeno, pilový kotouč je mnohobřítý nástroj, proto je v drtivé většině případů v záběru více, než jeden zub nástroje. Na obr. 2.5 je stanovena řezná síla pro všechny zuby záběru pomocí grafické metody.



Obr. 2.5 Silový rozklad pro více zubů v záběru [37].

Celkovou řeznou sílu F_c , danou součtem dílčích řezných sil lze vypočítat pomocí vzorce (2.5).

Vztah pro stanovení celkové **řezné síly** F_c pro všechny zuby v záběru (2.5) [5,43].

$$F_c = \sum_{i=1}^{n_z} F_{ci} = k_{c1.1} \cdot a_p \cdot f_z^{1-m_c} \cdot \sum_{i=1}^{n_z} (\sin \varphi_i)^{1-m_c} [N] \quad (2.5)$$

- kde: F_c [N] - řezná síla,
 $k_{c1.1}$ [MPa] - měrná řezná síla pro jednotkový průřez třísky ($A_D = 1 \text{ mm}^2$),
 a_p [mm] - jmenovitý průřez třísky i-tého zubu,
 f_z [mm] - posuv na zub,
 m_c [-] - konstanta,
 n_z [-] - počet zubů v záběru,
 φ_i [°] - úhel posuvového pohybu.

Dalším logickým krokem po stanovení celkové řezné síly pro všechny zuby v záběru je stanovení krouticího momentu M_k pro všechny zuby v záběru, podle rovnice 2.6.

Vztah pro stanovení **krouticího momentu** M_k pro všechny zuby v záběru (2.6) [26].

$$M_k = F_c \cdot \frac{D}{2 \cdot 10^3} = \left(k_{c1.1} \cdot a_p \cdot f_z^{1-m_c} \cdot \sum_{i=1}^{n_z} (\sin \varphi_i)^{1-m_c} \right) \cdot \frac{D}{2 \cdot 10^3} [N \cdot m] \quad (2.6)$$

- kde: M_k [N.m] - krouticí moment pro všechny zuby v záběru,
 F_c [N] - řezná síla,
 D [mm] - průměr nástroje,
 $K_{c1.1}$ [MPa] - měrná řezná síla i-tého zubu,
 a_p [mm] - jmenovitý průřez třísky i-tého zubu,
 f_z [mm] - posuv na zub,
 m_c [-] - konstanta,
 n_z [-] - počet zubů v záběru,
 φ_i [°] - úhel posuvového pohybu.

3 NÁVRHY PRO VÝROBNÍ PRAXI

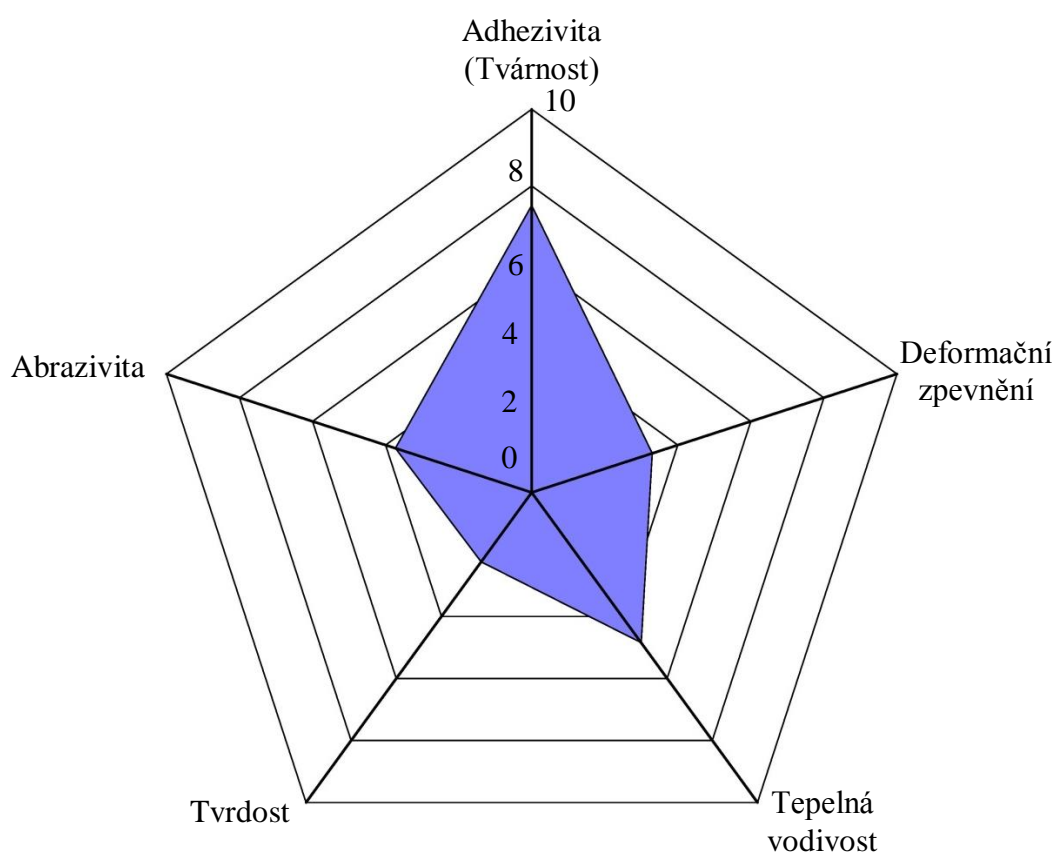
Před započítím sestavování návrhů, které by mohly přinést technologické zlepšení procesu řezání tenkostěnných součástí, je důležité se seznámit s aktuálním stavem, ze kterého se vychází. Proto bude na úvod této kapitoly provedena sumarizace hlavních činitelů, vstupujících do procesu. Prvotním parametrem, o kterém je v každém procesu nutno vědět nejvíce informací je vstupní materiál.

3.1 Vstupní obráběné materiály

Pro výrobu zarážecích kotev (hmoždinek) do zdiva se používají dva materiály, které jsou svými vlastnostmi dost odlišné. Jedním z materiálů je relativně snadno obrobitelná uhlíková ocel. Druhým materiálem je austenitická korozivzdorná ocel, která je všeobecně považovaná za materiál hůře obrobitelný.

3.1.1 Uhlíková ocel

Prvním materiálem, který se používá pro výrobu hmoždinek je nelegovaná uhlíková ocel s označením AISI 1015, jejíž chemické složení je v tab. 3.1 a mechanické vlastnosti v tab. 3.2. Ekvivalentem tohoto materiálu je materiál s vlastnostmi a chemickým složením dle ČSN 41 2023.



Obr. 3.1 Polární diagram obrobitelnosti oceli AISI 1025 [40].

Vstupním polotovarem pro řezání zářezových kotev je trubička vyráběná pomocí zpětného protlačování. Na konci výrobního procesu je výrobek galvanicky pokovován, aby nedocházelo k jeho korozi. Na obr. 3.1 je polární diagram obrobiteľnosti oceli AISI 1025, jejíž obrobiteľnost a mechanické vlastnosti jsou srovnatelné s ocelí AISI 1015. Vlivem dobré tvárnosti materiálu, tudíž nízkým hodnotám meze kluzu R_e a meze pevnosti R_m , je největším problémem při obrábění vysoká adheze odebíraného materiálu k nástroji. Ocel 12 023 se mimo jiné používá pro výrobu šroubů, čepů, vačkových hřídelů, ozubených a řetězových kol [45].

Tab. 3.1 Chemické složení oceli AISI 1015 [46].

Chemické složení [hm. %]			
C	Mn	P max.	S max.
0,13÷0,18	0,30÷0,60	0,040	0,050

Tab. 3.2 Mechanické vlastnosti oceli AISI 1015 [46,47].

Re [MPa]	Rm [MPa]	A ₅ min. [%]
325	385	8

3.1.2 Austenitická korozivzdorná ocel

Austenitické oceli jsou nejrozšířenější korozivzdorné oceli (60÷70 %), kdy hlavními legujícími prvky jsou chrom a nikl, přičemž chromu je nad 12 %, aby docházelo k vytváření pasivační vrstvy a bylo zabráněno korozi. Nikl ovlivňuje převážně strukturu a mechanické vlastnosti oceli. Austenitická ocel je houževnatá s vysokou tažností, má větší pevnost při vyšších teplotách, nízkou mez kluzu a je paramagnetická [40,48].

Použití tohoto materiálu v praxi se uplatňuje pro nádoby a potrubí v korozním prostředí v chemickém, potravinářském, farmaceutickém a těžářském průmyslu. Některé druhy austenitických ocelí se používají pro hutní zařízení, nebo pro výrobu prvků přehřívačů páry [4949494949]. Chemické složení oceli je v tab. 3.3.

Tab. 3.3 Chemické složení oceli ČSN 41 7346 (X5CrNiMo17-12-2) [47].

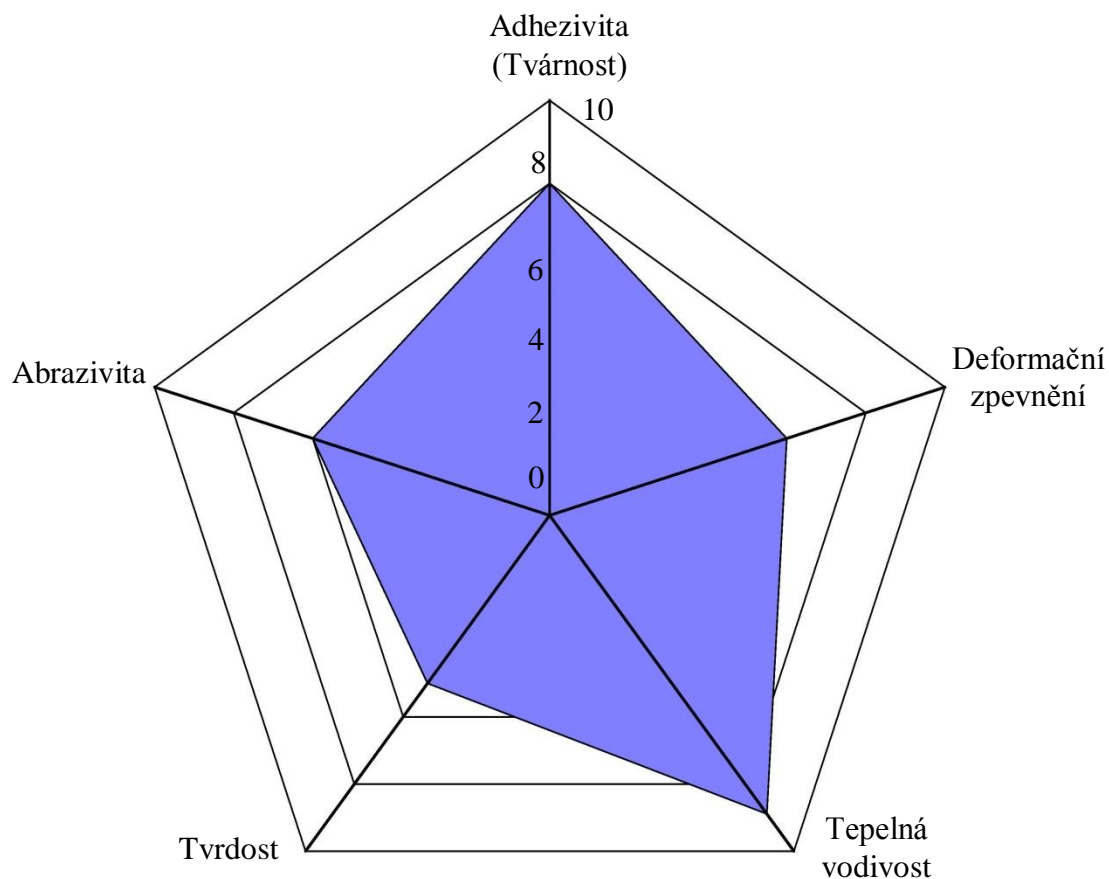
Chemické složení [hm. %]								
C max.	Si max.	Mn max.	P max.	S	Cr	Ni	Mo	N max.
0,07	1,00	2,00	0,045	0,012÷0,03	16,5÷18,5	10,0÷13,0	2,0÷2,5	0,11

Tab. 3.4 Mechanické vlastnosti oceli ČSN 41 7346 (X5CrNiMo17-12-2) [47].

Rp _{0,2} min. [MPa]	Rm [MPa]	A ₅₀ min. [%]
560	700÷850	20

Austenitická korozivzdorná ocel se považuje za špatně obrobiteľný materiál, což lze vidět na polárním diagramu obrobiteľnosti (obr. 3.2). Obrobiteľnost nejvíce znesnadňují nízká tepelná vodivost, vysoké deformační zpevnění a značná adheze

materiálu obrobku k nástroji. Na obrobitelnost tohoto druhu ocelí má také vliv způsob zpracování polotovaru, pokud má například tažená tyč obrobitelnost 1, výkovek má 0,8 a u odlitku jen 0,6. [40,42,50].



Obr. 3.2 Polární diagram obrobitelností austenitických korozivzdorných ocelí [51].

Deformační zpevnění materiálu je způsobeno trvalými změnami v povrchové struktuře obrobku. U austenitických ocelí je tento jev typický, kdy za působení vysoké rychlosti plastické deformace dochází k přeměně austenitické struktury na martenzitickou. Následně mohou na ploše obrobku vzniknout oblasti s extrémně vysokou tvrdostí. Pokud je materiál obráběn s malým posuvem objevuje se riziko, že zpevněný materiál bude do větší hloubky, než je odřezávaná vrstva, což vede k výraznému opotřebení nástroje. Částečné potlačení zpevňování spočívá v přidání niklu (síry) jako legujícího prvku, který slouží ke stabilizaci austenitu [40,42,48,50,51].

Tepelná vodivost je vlastnost materiálu, která značně ovlivňuje řezný proces. Pokud má materiál obrobku nízkou tepelnou vodivost, dochází k přestupu tepla generovaného v místě řezu převážně do nástroje, konkrétně do bříty. Míra tepelné vodivosti je dána hlavně množstvím obsažených prvků v oceli, které jsou tvrdé a mají vysoký bod tání. Řezný materiál by si měl zachovávat tvrdost i za vysokých teplot. Nejčastějším opotřebením vlivem nedostatečného odchodu tepla je plastická deformace [40,51].

V tab. 3.4 jsou mechanické vlastnosti tohoto materiálu. Na první pohled je zřejmá vysoká tvárnost, což je opět vlastnost nepříznivá pro třískové obrábění. S vysokou tažností je úzce spjata tvorba třísky a její odchod z místa řezu. Nástroj, zejména jeho povlak musí

mít dobrou odolnost proti adhezi, což znamená nízký koeficient tření na čele nástroje. Pro obrábění takovýchto materiálů je výhodné použít houževnatější řezné materiály. Při procesu vzniku a zániku nárůstku dochází například k drobnému vylamování ostří a odlupování povlaku. Geometrie nástroje by měla být taková, aby docházelo ke vhodnému utváření třísky a byla kompenzovaná vysoká tažnost oceli [40,51].

V některých případech se zvyšuje obrobiteľnosť týchto ocelí pomocí úmyslného vytváření vměstků. Provádí se to například zvýšením obsahu síry na $0,15 \div 0,35$ % nebo vápníku. Takovéto oceli jsou potom označovány jako automatové korozivzdorné oceli. Nevýhodou je, že takto ošetřená ocel ztrácí část svojí odolnosti proti korozi [40].

3.2 Výsledný produkt

Výsledným produktem je kovová zarážecí kotva do zdiva (obr. 3.3). Polotovár je zhruba do jedné poloviny své délky rozřezán na čtyři části, „křídélka“. Po zasunutí kotvy do betonu je použit přípravek, pomocí kterého dojde k roztažení „křidélek“ a vzepření kotvy v materiálu, což zabraňuje jejímu vypadnutí. Hmoždinky se používají například pro přidělování potrubních a vzduchotechnických rozvodů, kabelových tras nebo konzol [52].

Vzhledem k aplikaci produktu a jakou funkci plní „křídélka“ lze říct, že se při obrábění není třeba příliš zabývat drsností povrchu nebo tolerancemi. V tomto případě je stěžejní vysoká produkce, což znamená co nejvyšší řezné podmínky a krátké strojní časy.



Obr. 3.3 Zarážecí kotva [52].

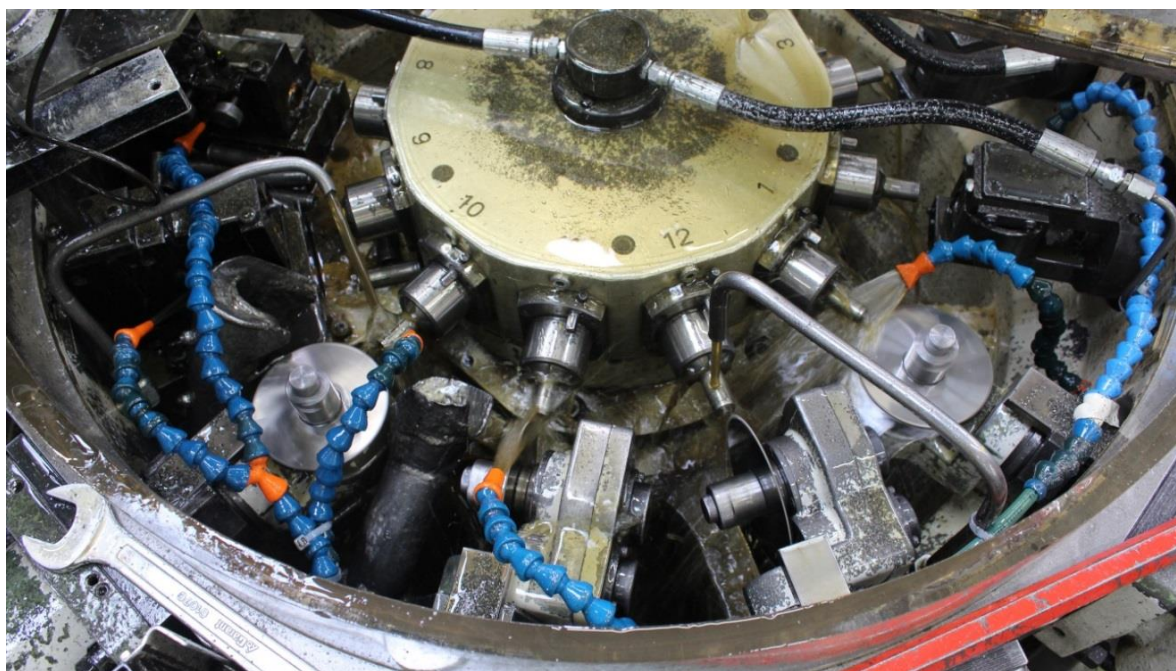
3.3 Používaný řezný nástroj

Používaným nástrojem je kotoučová pila o rozměrech $100 \times 1,0 \times 22$, což označuje kotouč o průměru 100 mm, tloušťce 1 mm a upínacím otvorem průměru 22 mm. Používají se pilové kotouče ze dvou materiálů, a to z materiálu označovaném jako Emo5 a materiálu označovaném jako Dmo5 (oba popsány v kapitole 1.1.1). Kotouče jsou kaleny a popuštěny na výslednou tvrdost 64 ± 1 HRC [53].

Spolu se dvěma materiály se používají také dvě různé geometrie kotoučů, typ zubu A (šikmá hřbetní plocha) a typ zubu B (zaoblená hřbetní plocha). Důvodem použití různých geometrií a materiálů je snaha o nalezení vhodné kombinace těchto dvou parametrů pro konkrétní operaci řezání hmoždinek. Kotouče jsou dodávány bez povlaku. Na základě výsledků získaných ve firmě proběhl následně výběr rezného nástroje pro experiment.

3.4 Aktuální způsob obrábění

Obrábění probíhá na víceúčelovém stroji (obr. 3.4). Uprostřed je revolverová hlava, která se otáčí a přesouvá polotovary mezi jednotlivými operacemi. Stroj funguje automaticky a každý polotovar prochází šesti stanovišti. Ze zásobníků padají hmoždinky do podavače, který je upíná do kleštiny, což je první úkon. V druhé operaci dochází ke značení hmoždinek dle jejich velikosti pomocí dvou válečků. Na třetím stanovišti probíhá výroba závitů, následně je hmoždinka otočena o 180° (op. číslo 4), aby se mohlo realizovat její rozřezání. Poslední dvě stanoviště souží k podélnému a příčnému řezání hmoždinek. Obrábění probíhá za intenzivního přísunu oleje. Dle velikosti hmoždinek se odvíjí výrobní takt stroje.



Obr. 3.4 Víceúčelový automat.

Problémem, který při řezání nastává, spočívá ve velmi malém výkonu elektromotorů, zajišťujících pohyby kotoučových pil. Aby byla vyvozena dostatečná řezná síla, musí být dodáno určité množství energie. Každý motor je popsán svou výkonovou křivkou, kdy s rostoucími otáčkami motoru roste jeho výkon až do maximální hodnoty. Proto u těchto elektromotorů o nižším výkonu je nutné používat vyšší otáčky, aby byl dosažen potřebný řezný výkon. Od tohoto se odvíjí také otáčky, respektive řezná rychlost pilového kotouče, které jsou vysoko nad doporučenými hodnotami, což se projevuje na nižších trvanlivostech kotoučů.

Částečné zlepšení procesu bylo docíleno změnou prvku přenášejícího krouticí moment z výstupní hřídele elektromotoru. Dříve byl přenos realizován pomocí rozpěrného kuželu (obr. 3.5), bohužel při takovémto spojení nemusí být přenos krouticího momentu konstantní, což se promítá i do procesu řezání, proto byl tento prvek nahrazen pomocí pera těsného.



Obr. 3.5 Použitá hřídel před úpravou (vlevo) a po úpravě (vpravo).

3.5 Návrhy pro výrobní praxi

Při řešení technologického zlepšení byla pozornost věnována třem oblastem, které, jak je všeobecně známo, mají zásadní vliv na obráběcí proces. Jsou to geometrie nástroje, které se věnuje kapitola 3.5.1, volba vhodného procesního prostředí ve smyslu procesní kapaliny (kapitola 3.5.2). V poslední řadě je to volba vhodného deponovaného povlaku technologií PVD (kapitola 3.5.3). Při návrhu byla pozornost zaměřena na obrábění austenitické oceli, jejíž obrobitelnost je horší, než u uhlíkové oceli. Zlepšení bylo navrženo na základě odborné literatury. Ačkoli je prakticky nemožné najít literaturu na konkrétní téma řezání austenitické oceli kotoučovou pilou. Z toho důvodu se vycházelo z technologicky nejbližší operace, frézování.

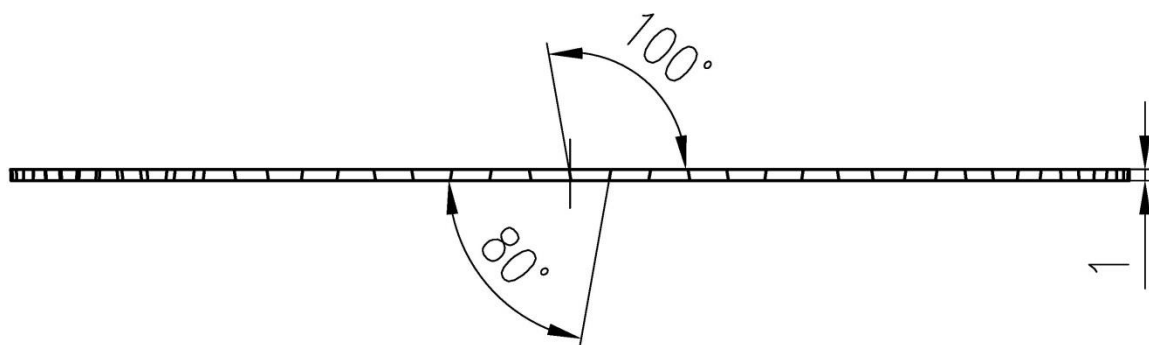
3.5.1 Volba geometrie pilového kotouče

Mezi výrobci není pouze jedna vhodná geometrie pro řezání konkrétního materiálu, což dokazuje tab. 3.5. Lze pouze pozorovat logický trend, že se zvyšující se pevností materiálu se zmenšují úhly čela a hřbetu nástroje. Je to z důvodu většího namáhání zubu a potřeby jeho vyšší tuhosti.

Tab. 3.5 Doporučené orto. úhly čela a hřbetu dle jednotlivých výrobců [12,54,55,56,57].

Výrobci	Materiál		Ocel do Rm = 500 MPa	
	Austenitická korozivzdorná ocel			
ARNTZ	$\gamma_o = 16 \div 18^\circ$	$\alpha_o = 6 \div 8^\circ$	$\gamma_o = 18 \div 20^\circ$	$\alpha_o = 8 \div 12^\circ$
GSP Zborovice	$\gamma_o = 16 \div 18^\circ$	$\alpha_o = 6 \div 8^\circ$	$\gamma_o = 18 \div 20^\circ$	$\alpha_o = 8 \div 12^\circ$
STARK	$\gamma_o = 12^\circ$	$\alpha_o = 6^\circ$	$\gamma_o = 18^\circ$	$\alpha_o = 12^\circ$
KARNASCH TOOLS	$\gamma_o = 12^\circ$	$\alpha_o = 6^\circ$	$\gamma_o = 18^\circ$	$\alpha_o = 12^\circ$
DRESS TOOLS	$\gamma_o = 12^\circ$	$\alpha_o = 6^\circ$	$\gamma_o = 18^\circ$	$\alpha_o = 12^\circ$

Pokud je posuzován proces řezání kotoučovou pilou, jako obrábění válcovou frézou o velmi malé tloušťce, je možné si některé prvky frézy představit i na pilovém kotouči. Zejména byla zvažována možnost broušení zubů pilového kotouče s nenulovou hodnotou úhlu sklonu hlavního ostří λ_s (obr. 3.6). Takovýmto způsobem broušené ostří by teoreticky zlepšovalo podmínky pro tvorbu třísky a urychlovalo její odchod z místa řezu. Zuby pilového kotouče by plynuleji zabíraly do materiálu a tím potlačovaly možný vznik vibrací. Předpokládalo by se také zvýšení trvanlivosti nástroje a lepší jakost povrchu [2].

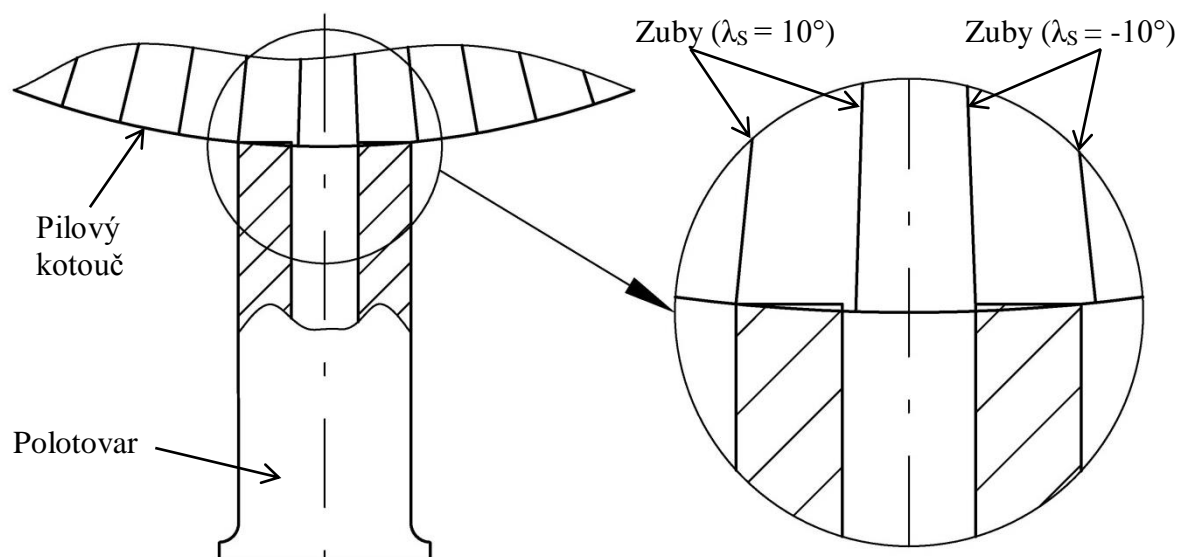


Obr. 3.6 Naznačení úhlů sklonu hlavního ostří.

Nevýhodou je vznik osové síly, která směřuje do vřetena stroje. Při frézování se toto řeší obráběním dvěma frézami upnutými na jednom vřetení, přičemž vůči sobě mají zuby do opačné šroubovice. Takto zvolená dvojice fréz docílí toho, že se osové síly vyruší. Tuto myšlenku lze přenést i na pilový kotouč, který by měl zuby pod určitým úhlem sklonu hlavního ostří [2].

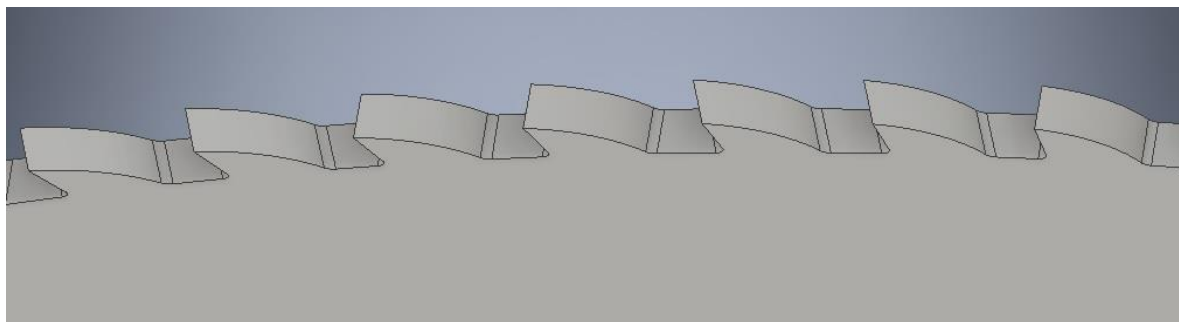
Není možné, aby se na jedno vřeteno v univerzálním stroji upnuly dva pilové kotouče. Proto jsou zuby kotouče broušeny vždy střídavě s kladným úhlem λ_s (představuje jednu frézu na vřetení) a se záporným úhlem λ_s (představuje druhou frézu na vřetení). Zuby pilového kotouče jsou voleny tak, aby byly v záběru vždy pouze dva zuby, s rozdílným úhlem sklonu hlavního ostří. Tato dvojice byla napočítaná se snahou, aby docházelo k simultánnímu zajištění a vyjždění těchto dvou zubů z materiálu. Výsledná rozteč mezi zuby je menší, než otvor v polotovaru (obr. 3.7), proto, aby bylo docíleno

předchozích požadavků, jsou vždy dva po sobě jdoucí zuby konstruovány se stejným úhlem sklonu hlavního ostří $\lambda_S = 10^\circ$ a po nich jdoucí dvojce s úhlem opačným $\lambda_S = -10^\circ$ (obr. 3.6 a obr. 3.8). Na základě této myšlenky byl vytvořen model kotouče, o průměru 100 mm, tloušťce 1 mm a 92 zuby.



Obr. 3.7 Schéma pro výpočet počtu zubů.

Navrhovaná geometrie kotouče byla poptávána u českých společností zabývajících se těmito nástroji, bohužel nebylo v jejich možnostech pilky vyrobit. Jedna společnost se už o takovéto provedení kotoučů se šikmým ozubením pokoušela, avšak broušení bylo velmi složité programově nastavit, aby byla výsledná kvalita dostačující. Přesto se kotouče (s nedostatečnou kvalitou broušení) vyrobit povedlo. Následné experimenty ukázaly, že vychýlené zuby byly značně namáhány a při řezu se lámaly. Alternativním řešením výroby poptávaných kotoučů byla možnost použít nový stroj, který v té době ve strojovém parku firmy nebyl, ale i tam se vyskytly problémy s upínáním kotouče a náročností naprogramování stroje. Zásadní překážkou je mimo jiné i malá tloušťka kotouče [53].



Obr. 3.8 Model pilového kotouče se šikmým ozubením.

3.5.2 Volba procesní kapaliny

Přehled o možnostech použití jednotlivých řezných kapalin pro obrábění různých materiálů, je klíčovým předpokladem k tomu, aby se mohl stát řezný proces výkonnější. Volba kapaliny ovlivňuje několik faktorů, a sice mechanismus utváření třísky, produktivitu

obrábění a náklady s ním spojenými. Je všeobecně známé, že se zvyšující se teplotou se urychluje opotřebení řezného nástroje, proto se na procesní kapaliny kladou požadavky na snížení teploty v oblasti řezu, snížení koeficientu tření skrze mazací schopnosti a rychlý odvod třísek z místa řezu [39,58].

Vzhledem ke skutečnosti, že k řezání je použit víceúčelový stroj, na kterém probíhá i výroba vnitřních závitů, je logické zvolit jako procesní kapalinu řezný olej, protože právě u technologie výroby závitu jsou mazací schopnosti kapaliny stěžejní. Bohužel pro řezání kotoučovou pilou by byl požadavek na procesní kapalinu lehce odlišný, ale musela se brát v potaz technologicky „náročnější“ operace, která se na stroji provádí.

Na trhu se objevují řezné oleje trojího druhu, minerální, živočišné a rostlinné, přičemž pro zlepšení vlastností se přidávají aditiva (EP aditiva, AW aditiva). Účinek EP aditiv spočívá v chemické reakci mezi kovově čistým povrchem a těmito aditivy. Nejčastěji se používají sloučeniny síry, fosforu a chloru. Každý prvek se stává aktivním při různé teplotě. Takto aditivované oleje prokazatelně zvyšují životnost nástroje, snižují smykové tření mezi nástrojem a obrobkem, napomáhají vzniku tzv. mezní vrstvy a brání adhezi obráběného materiálu na nástroj ve formě studených svarů [39].

Jako značnou nevýhodu používaných řezných emulzí a olejů lze s jistotou považovat jejich ekologická zátěž a především fakt, že představují zdravotní riziko pro obsluhu stroje. Dle [59] až 80 % nemocí pracovníků u obráběcích strojů je způsobeno kontaktem jejich pokožky s řeznými kapalinami, které se stávají stále komplexnějšími, mohou být velmi škodlivé a způsobovat podráždění, nebo alergickou reakci pokožky. Ve špatně udržovaných emulcích může docházet k rozvoji plísní a bakterií, které jsou zdrojem mikrobiálních toxinů.

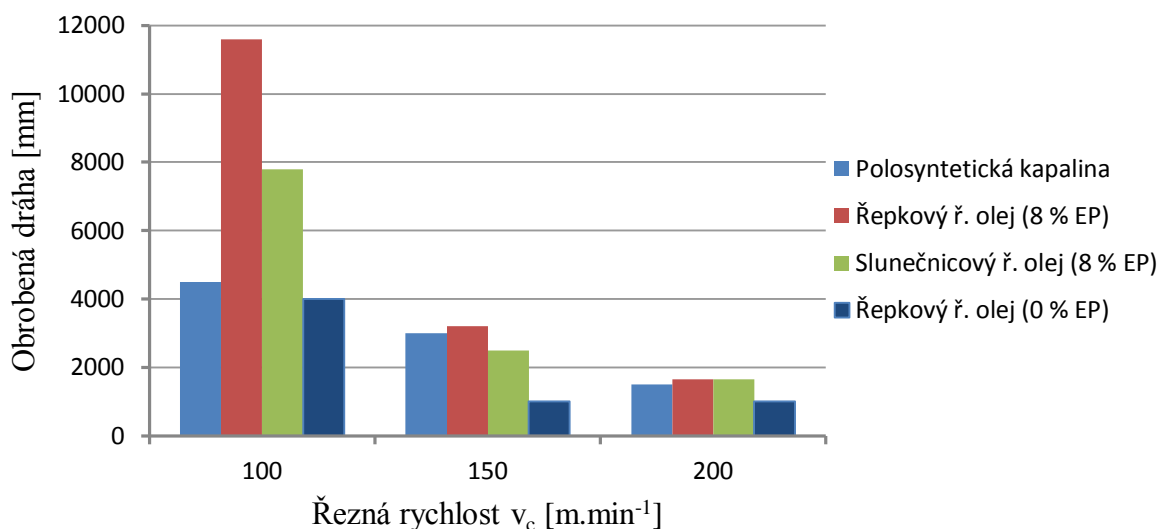
Vhodnou náhražkou se zdají být rostlinné řezné oleje, které jsou dobře ekologicky odbouratelné a v mnoha technologických operacích zcela dostačující. Takovéto oleje jsou v drtivé většině pro zlepšení jejich vlastností míseny s různými aditivy, například proti zpěnění, potlačující množení bakterií, pro ochranu proti korozi a EP aditivy. Nejčastěji používané jsou řezné oleje vyrobené z řepky olejné nebo slunečnice [60]. V tab. 3.6 jsou sepsány výhody a nevýhody rostlinných řezných olejů.

Tab. 3.6 Výhody a nevýhody rostlinných řezných olejů [61,62].

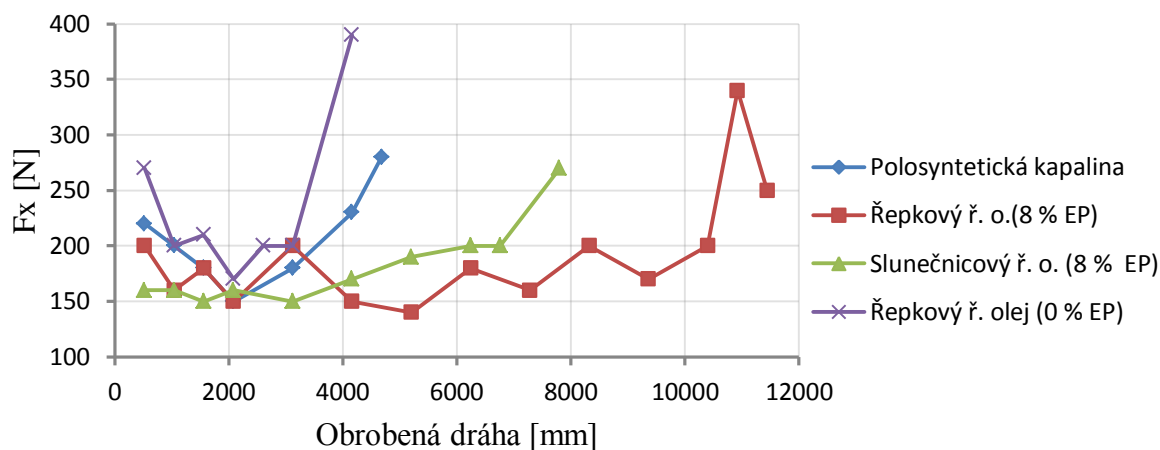
Výhody	Nevýhody
Dobrá odbouratelnost	Nízká tepelná stabilita
Nízký dopad na životní prostředí	Oxidační stabilita
Kompatibilita s aditivy	Vysoké teploty tuhnutí
Nízké výrobní náklady	Nízká ochrana proti korozi
Široký rozsah použití	
Nízká toxicita	
Vysoké teploty vzplanutí	
Nízká těkavost	
Vysoké indexy viskozity	

Možnostmi aplikace rostlinného oleje, jako řezné kapaliny se zabývalo mnoho autorů. Například v [60] autoři porovnávali možnosti užití různých procesních kapalin při čelním frézování austenitické korozivzdorné oceli AISI 304. Použité kapaliny byly

řepkový řezný olej (8 % EP), slunečnicový řezný olej (8 % EP), řepkový řezný olej (0 % EP) a polosyntetická kapalina. Vzhledem k obráběnému materiálu bylo na nástroji možno pozorovat typické formy opotřebení, jako jsou výmol na čele, nárůstky, teplotní trhliny na ostří a vrubové hřbetní opotřebení. Testování proběhlo ve dvou fázích. Nejprve se měnily hodnoty pouze řezné rychlosti, následně hodnoty pouze posuvové rychlosti. V průběhu testování byla sledována trvanlivost nástrojů (obr. 3.9) a silové zatížení v průběhu experimentu (obr. 3.10).



Obr. 3.9 Trvanlivost nástroje pro různé procesní kapaliny a řezné rychlosti [60].



Obr. 3.10 Složka celkové síly v ose x; $v_c = 100 \text{ m.min}^{-1}$ [60].

Z grafů lze vyvodit, že rostlinný řezný olej vyrobený rafinací řepkového oleje může být po přidání 8 % EP aditiv vhodnou volbou. Při obrábění austenitické korozivzdorné oceli s použitím nižších řezných rychlostí, lze prodloužit trvanlivost nástroje a snížit velikosti sil na něj působících.

Výsledky autorů [60] částečně potvrdili autoři v [63], kteří prováděli podobný experiment s větším počtem zkušebních vzorků, při soustružení materiálu AISI 304.

Opět se sledoval rozvoj opotřebení a vznikající řezné síly při soustružení. Závěrem bylo, že při použití řepkového řezného oleje s 8 % EP aditivu bylo dosaženo menšího opotřebení a silového zatížení nástroje. Dále bylo zjištěno, že se zvyšujícím se procentem přidaných aditiv roste náchylnost ke tvorbě nárůstků. Podobných výsledků bylo dosaženo i při vrtání [64].

Testování procesních kapalin a jejich účinek na konkrétní proces obrábění je relativně nákladná operace. Souvisí s tím nutnost dokonalého očištění stroje od předchozích používaných procesních kapalin, včetně ošetření netěsností z hydraulických prvků, aby nedošlo ke kontaminaci testovaného vzorku. Proto bylo rozhodnuto, že bude testována třetí možnost, a to nástroje s různými povlaky. Tento experiment je ekonomicky nejméně náročný a přesto může dosáhnout velmi uspokojivých výsledků.

3.5.3 Volba povlakování kotouče

Jak již bylo zmíněno, aktuálně se pro řezání hmoždinek používají nepovlakované HSS kotouče. Z toho důvodu je v tomto směru značná příležitost pro zlepšení procesu, kterého lze dosáhnout minimálně zvýšením životnosti kotouče a používaných řezných podmínek. Volba vhodných povlaků je relativně zdoluhavý proces, který probíhá s ohledem na podkladový materiál, materiál obrobku, technologii obrábění, řezné podmínky a mnoho dalších faktorů.

Provedení povlakování a jeho ceny byly konzultovány s mnoha povlakovacími společnostmi. Nakonec byla vybrána česká společnost SHM, s.r.o., která má s povlakováním nástrojů dlouholeté zkušenosti. Po projednání možnostech povlakování a různých doporučeních byly vybrány následující povlaky:

TiCN MP

Doplňkové označení MP v názvu povlaku znamená *Multi Purpose* (Víceúčelový), což pouze poukazuje na jeho široké možnosti použití. Ti (C, N) povlak je považován jako další vývojový stupeň vrstev TiN. Přidáním uhlíku do struktury povlaku se dosahuje zvýšení pevnosti krystalové mřížky, s tím je spojený nárůst tvrdosti (až 3 400 HV) a odolnosti proti opotřebení. Uhlík také příznivě přispívá ke snižování frikčního koeficientu ($\mu = 0,2$), ale pouze do teploty 400 °C, což je taky nejvyšší teplota pro použití tohoto povlaku. Struktura povlaku je povolna měnící se, gradientní. I přes některé jeho nevýhody je v mnoha operacích nezastupitelný (závitování), zejména díky jeho nízké ceně a zmiňovaným vlastnostem [65,66]. Základní vlastnosti povlaku jsou zmíněny v tab. 3.7.

Relativně nízká maximální teplota použití této vrstvy by pro mnoho operací byla naprosto nevyhovující. Ačkoliv se obrábí špatně obrobitelný materiál, s nízkou tepelnou vodivostí, limitní teploty se při řezání nedosahuje vzhledem k několika předpokladům. Řeže se tenkostěnná součást, kde není problém s odchodem třísek, ani s přívodem řezné kapaliny do místa řezu a povlak má velmi nízký koeficient tření.

Shrnutí výběru povlaku TiCN MP:

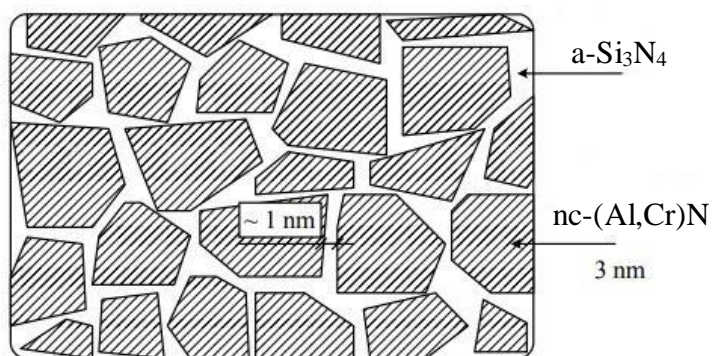
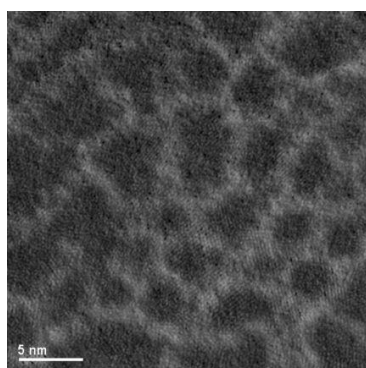
Ekonomické hledisko	- Vzhledem k relativně nízké ceně nástroje, je logické vybírat i povlak, který bude cenově odpovídající.
Nízký koeficient tření	- Nízký koeficient frikce znamená nižší počet možných zárodků pro tvorbu nárůstků.
Vysoká tvrdost	- Vysoká tvrdost znamená větší odolnost proti abrazivnímu opotřebení
Adheze k substrátu	- Povlak Ti(C, N) má vlastnosti předurčující k tomu, aby byla dosažena dobrá adheze k podkladu z HSS.

Tab. 3.7 Základní vlastnosti povlaku TiCN MP [67].

ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI POVLAKU	
Mikrotvrdost	34 GPa
Tloušťka povlaku	1÷4 μm
Střední aritmetická úchylka profilu Ra	0,20÷0,25 μm
Teplota použití	400 °C

ALWIN

Jedná se o nanokompozitní povlak Cr-Al-Si-N s vysokým obsahem chromu. Princip tvorby nanokompozitních povlaků je založen na řízené segregaci vícefázového systému tvořící stabilní nanokompozit s malými krystality zakotvenými v matici s krátkými mezikrystalickými vzdálenostmi (obr. 3.11). Jednoduše řečeno jedná se o materiál tvořený dvěma a více složkami, které jsou vzájemně nerozpustné, přičemž alespoň jedna složka musí být krystalická [66,68].



Obr. 3.11 Nanokompozitní povlak Cr-Al-Si-N [68,69].

Hlavní výhodou povlaků s obsahem chromu je jejich nesporná odolnost proti abrazivnímu opotřebení. Ve spojení s křemíkem, který má výbornou tepelnou odolnost, získáváme velmi vhodný povlak pro třískové obrábění. Nahrazením titanu chromem bylo docíleno snížení vnitřní zbytkové napjatosti vrstvy, což umožnilo vytvářet

kvalitnější povlaky na velmi ostrých geometriích nástrojů, nebo vytvoření vrstvy o větší tloušťce [66,70].

Povlak se vyznačuje mikrotvrdostí 35 GPa a tepelnou odolností přes 1 000 °C. Deponování této vrstvy je vhodné i pro nástroje vyrobené z HSS, kde se využívá výborné přilnavosti povlaku, zejména z důvodu jeho podobné tepelné roztažnosti jako u oceli. Používá se pro obrábění korozivzdorných materiálů, hliníkových slitin a dalších materiálů, které mají sklony k nalepování se na nástroj v průběhu řezného procesu. Jako podklad, s lepší adhezí k základnímu materiálu je nejprve nanесena vrstva CrN, na kterou se deponuje povlak nanokompozitní [71,67].

Odolnost proti vysokým teplotám je dána především obsahem Al, který dokáže vytvářet ochrannou vrstvu Al_2O_3 (případně obsahem chromu, vytvářející Cr_2O_3), která funguje jako tepelná a chemická bariéra. Vhodná nanokompozitní struktura umožňuje rychlou difuzi hliníku po krystalových hranicích na povrch nástroje, což urychlí proces tvorby vrstvy zabraňující adhezí obráběného materiálu na nástroj a snižující jeho tepelnou vodivost [72].

Přidáním Si do struktury Al-Cr-N se nejenom zvyšuje tvrdost, ale dle [73] dochází také k poklesu koeficientu frikce až o 30%. Často je povlak k nalezení u odvalovacích fréz [73,74]. V tabulce 3.8 jsou základní vlastnosti povlaku ALWIN.

Shrnutí důvodů výběru povlaku ALWIN:

Odolnost proti oxidaci	- Obsah Al v povlaku zaručuje tepelnou odolnost až do 1 000 °C.
Adhezní odolnost	- Povlak odolný proti nalepování obráběného materiálu na nástroj.
Vysoká tvrdost	- Vysoká tvrdost znamená menší náchylnost pro abrazivní opotřebení.
Zbytková napjatost	- Nízké hodnoty zbytkové napjatosti, které dovolují povlakovat i ostré geometrie.

Tab. 3.8 Základní vlastnosti povlaku ALWIN [67].

ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI POVLAKU	
Mikrotvrdost	35 GPa
Tloušťka povlaku	2÷4,5 μm
Střední aritmetická úchylka profilu Ra	0,15÷0,20 μm
Teplota použití	1 000 °C

V nabídce povlaků je i produkt Al-Ti-Si-N. Ačkoliv je tento povlak na první pohled vhodnější, zejména díky své tvrdosti, HSS oceli nejsou vhodným podkladovým materiálem a mohlo by dojít k nedostatečné adhezí povlaku na ostří nástroje [75,76].

TripleCoating Cr¹

Pod tímto obchodním názvem se skrývá povlak skládající se ze tří vrstev. Je vytvářen díky speciální technologii povlakování pomocí 4 katod, kdy tři LARC katody (Lateral Rotating Cathodes) jsou umístěny ve dveřích a jedna CERC katoda (Central Rotating Cathode) je uprostřed povlakovací komory. Ve směru od substrátu je nejprve nanесena velmi tenká vrstva TiN (~200 nm) s výbornou adhezí k substrátu, vytvářená z čistého Ti targetu. Středová vrstva Al-Ti-N se vyznačuje nízkým vnitřním pnutím, vysokou houževnatostí, tvrdostí a odolností proti otěru. Vlastnosti vrchní vrstvy Cr Al-Si-N již byly zmiňovány výše [77,78].

Shrnutí důvodů výběru povlaku TripleCoating Cr:

- | | |
|------------------------|--|
| Odolnost proti oxidaci | - Obsah Al v povlaku zaručuje tepelnou odolnost až do 1 000 °C. |
| Adhezní odolnost | - Povlak odolný proti nalepování obráběného materiálu na nástroj. |
| Vysoká tvrdost | - Vysoká tvrdost znamená menší náchylnost na abrazivní opotřebení. |
| Struktura povlaku | - Povlak ze tří hlavních vrstev, jejichž kombinace je vhodná i pro obrábění korozivzdorných materiálů. |

BIGAAN²

Povlak na bázi Al-Cr-B-N, který se neobjevuje ve standardní nabídce, na jehož vývoji firma začala pracovat před třemi lety. Vysokému potenciálu povlaku napovídá fakt, že si ho k využívání vybrala i Škoda Auto, a.s. [79]. Informací o tomto produktu je málo, protože se jedná o relativně nový druh povlaku. O vlastnostech povlaků na bázi Al-Cr-N již existuje mnoho poznatků a jedná se o dobře zmapované povlaky. Autoři v [80] se zabývali vlastnostmi povlaku, po přidání boru. Bor má v povlaku, stejnou funkci, jako křemík u výše zmiňovaných povlaků, tzn., spolu s dusíkem vytváří amorfní matici, ve které jsou krystaly Al-Cr-N. Jedná se tedy opět o nanokompozitní povlak. Tyto vrstvy mají v porovnání s Al-Cr-N povlakem vyšší tvrdost, která je srovnatelná s ostatními nanokompozitními povlaky. Obecně se přidáním boru zvýšily mechanické vlastnosti povlaku, čímž se z něho stává slibná otěruvzdorná deponovaná vrstva.

Shrnutí důvodů výběru povlaku BIGAAN:

- | | |
|--------------------------|---|
| Nanokompozitní struktura | - Lze očekávat podobně výhodné vlastnosti, jako má povlak Al-Cr-Si-N nebo Ti-Al-Si-N. |
| Vysoká tvrdost | - Vysoká tvrdost znamená menší opotřebení vlivem abraze. |

¹ Pro tento povlak nejsou základní informace z konkurenčních důvodů k dispozici.

² Pro tento povlak nejsou základní informace z konkurenčních důvodů k dispozici.

V úvahu také přicházel v praxi často skloňovaný povlak (Al, Ti) N. Nakonec byl ale vyřazen na úkor vrstev na bázi (Al, Cr)N. Je to z důvodu, že autoři v [81] prováděli experiment pro získání koeficientů tepelné vodivosti. Vrstvy s obsahem titanu vykazovaly se vzrůstající se teplotou i rostoucí koeficienty tepelné vodivosti. Koeficient (Al, Cr) N povlaku měl ale naopak od teploty 150 °C tendenci klesat, což by teoreticky mohlo pomoci při obrábění austenitických ocelí, kde při obrábění přechází značná část tepla do nástroje.

Ekonomické zhodnocení nástrojů s povlakem

To, co je pro každý návrh nejpodstatnější, je možná úspora nákladů po jeho implementaci. Proto byla provedena hrubá kalkulace pro určitý rozměr hmoždinky. Cena povlakování se samozřejmě bude lišit dle počtu kusů, v tab. 3.9 jsou ceny povlakování pilového kotouče 100×1,0×22, při dávce 20 ks. Poslední sloupec v tab. 3.9 ukazuje procentuální navýšení ceny kotouče oproti nepovlakované verzi (400 Kč).

Tab. 3.9 Ceny povlaků firmy SHM, s.r.o. [82].

Název povlaku	Cena povlaku	Celková cena kotouče	Navýšení ceny kotouče
TiCN MP	135 Kč	535 Kč	33,75 %
ALWIN	135 Kč	535 Kč	33,75 %
TripleCoating Cr	160 Kč	560 Kč	40,00 %
BIGAAN	215 Kč	615 Kč	53,75 %

Seznam dalších položek vstupujících do kalkulace:

Cena nepovlakovaného kotouče	N_k	400 Kč
Hodinová sazba stroje	N_{hs}	450 Kč.h ⁻¹
Otáčky nástroje	n	330 min ⁻¹
Posuv na zub	f_z	0,01 mm
Obráběná dráha	L	21 mm
Jednotkový strojní čas	t_{AS}	3,82 s
Čas jedné směny	t_{js}	7,5 h
Teoretický počet vyrobených součástek za směnu	x_{js}	7 071 ks

Teoretický počet vyrobených součástek za směnu je vyšší, než počet reálně vyrobených. Důvodem je, že ve výpočtu nejsou zahrnuty vedlejší časy stroje, například časy otáčení revolverové hlavy. Reálně se počet součástek pohybuje okolo 4 000 ks za směnu. Toto zjednodušení, nebude mít na to, co je snahou výpočtem ukázat žádný vliv.

Kotouče v nejlepším případě zastávají trvanlivost v době trvání jedné směny. Pro zjednodušení výpočtu se bude předpokládat, že směna (7,5 h) odpovídá životnosti kotouče. V následujících výpočtech bude proveden výpočet pro nepovlakovaný kotouč

a kotouč s povlakem BIGAAN (cena kotouče $N_b = 615$ Kč), pro ostatní řezné nástroje budou zveřejněny pouze výsledky v tabulce 3.11.

Vztah pro stanovení **nákladů na směnu** N_{jsk} pro nepovlakovaný kotouč (3.1).

$$N_{jsk} = N_{hs} \cdot 7,5 + N_k \quad (3.1)$$

$$N_{jsk} = N_{hs} \cdot 7,5 + N_k = 450 \cdot 7,5 + 400 = 3\,775 \text{ Kč}$$

Vztah pro stanovení **nákladů na směnu** N_{jsb} pro kotouče s povlakem BIGAAN (3.2).

$$N_{jsb} = N_{hs} \cdot 7,5 + N_b \quad (3.2)$$

$$N_{jsb} = N_{hs} \cdot 7,5 + N_b = 450 \cdot 7,5 + 615 = 3\,990 \text{ Kč}$$

Pokud se uvažuje nepovlakovaný kotouč, jako reference (100 %), lze následně rychle odvodit, o kolik procent se zvýší náklady za směnu, při řezání povlakovaným kotoučem, vzorec 3.3.

Vztah pro stanovení **procentuálního nárůstu nákladů** P_{CB} (3.3).

$$P_{CB} = \frac{N_{jsb}}{N_{jsk}} \cdot 100 \quad (3.3)$$

$$P_{CB} = \frac{N_{jsb}}{N_{jsk}} \cdot 100 = \frac{3990}{3775} \cdot 100 = 105,7 \%$$

Z výpočtu vyplývá, že celkové náklady na směnu se s použitím kotouče s povlakem BIGAAN zvýší o 5,7 %. Dalším výpočtem 3.4 bude stanoven minimální počet kusů za směnu, které je potřeba vyrobit, aby se povlak „zaplatil“.

Vztah pro stanovení **minimálního teoretického počtu kusů za směnu** x_{jsb} pro kotouče s povlakem BIGAAN (3.4).

$$x_{jsb} = x_{js} \cdot \frac{P_{CB}}{100} \quad (3.4)$$

$$x_{jsb} = x_{js} \cdot \frac{P_{CB}}{100} = 7071 \cdot \frac{105,7}{100} = 7\,474 \text{ ks}$$

Zpětným přepočtem (3.6) se stanoví nová hodnota posuvu na zub, který ovlivňuje délku pracovního cyklu. Změna posuvu na zub byla zvolena, protože už při aktuální nastavované hodnotě 0,01 mm, je velké riziko, že zuby materiál spíše utváří, než odřezávají. Zvýšením posuvu na zub se proto nejenom zvýší výrobnost stroje, ale teoreticky se zlepší i proces řezání. Autor [28] uvádí, že pro kotouče s TiN povlakem lze navýšit hodnoty o 50 %, pro povlak Ti(C, N) až o 100 %.

Vztah pro stanovení jednotkového **strojního času** t_{ASb} pro kotouč s povlakem BIGAAN (3.5).

$$t_{ASb} = \frac{60}{\left(\frac{x_{jsb}}{7,5 \cdot 60}\right)} \quad (3.5)$$

$$t_{ASb} = \frac{60}{\left(\frac{x_{jsb}}{7,5 \cdot 60}\right)} = \frac{60}{\left(\frac{7474}{7,5 \cdot 60}\right)} = 3,61 \text{ s}$$

Vztah pro stanovení **hodnoty posuvu na zub** f_{zb} při obrábění kotoučem s povlakem BIGAAN (3.6).

$$f_{zb} = \frac{L}{n \cdot t_{ASb} \cdot z} \quad (3.6)$$

$$f_{zb} = \frac{L}{n \cdot t_{ASb} \cdot z} = \frac{21}{5,5 \cdot 3,61 \cdot 100} = 0,0106 \text{ mm}$$

Jak je ze vztahu 3.6 patrné, změna hodnoty posuvu je vzhledem k vysokému počtu kusů vyrobených za směnu v řádech deseti tisícín. Jak již bylo nastíněno, tato hodnota by se mohla s povlakovanými kotouči výrazně zvýšit. V tab. 3.10 jsou vypočítány počty kusů v závislosti na posuvové rychlosti, při konstantních používaných otáčkách 330 min^{-1} . V tab. 3.11 je ukázáno srovnání jednotlivých kotoučů.

Tab. 3.10 Teoretické hodnoty počtu vyrobených kusů za směnu při různých posuvech na zub.

Posuvu na zub f_z [mm]	Posuvová rychlost v_f [m.min ⁻¹]	Strojní čas řezání [s]	Teoretický počet vyrobených kusů za směnu [ks]
0,0100	330,0	3,818	7 071
0,0125	412,5	3,055	8 839
0,0150	495,0	2,545	10 607
0,0175	577,5	2,182	12 375
0,0200	660,0	1,909	14 143

Tab. 3.11 Porovnání pilových kotoučů.

Povlak	Náklady za směnu [Kč]	Procentuální náklady [%]	Strojní čas řezání [s]	Posuv na zub f_z [mm]	Teoretický počet vyrobených kusů za směnu [ks]
Bez povlaku	3 775	100,0	3,82	0,0100	7 071
TiCN MP	3 910	103,6	3,69	0,0104	7 324
ALWIN	3 910	103,6	3,69	0,0104	7 324
Triple. Cr	3 935	104,2	3,66	0,0104	7 371
BIGAAN	3 990	105,7	3,61	0,0106	7 474

4 VERIFIKACE NÁVRHU A ŘEŠENÍ

Při testování řezných nástrojů se v drtivé většině případů experiment zaměřuje na pozorování dvou až tří hlavních parametrů. Jsou to, průběh opotřebení nástroje a sledování jeho trvanlivosti do stanovené hodnoty, rozvoj silového zatížení nástroje v průběhu obrábění, a vlastnosti obráběného povrchu, zejména jeho drsnosti. Tento experiment je koncipován jako dlouhodobá zkouška, což znamená pozorování změn určitých proměnných v závislosti na čase (dráze) obrábění. Sledovanými parametry v tomto experimentu jsou silové zatížení, které nejvíce vypovídá o tom, co se v procesu obrábění děje a měnící se šířka fazetky opotřebení na hřbetě VB.

4.1 Obráběný materiál

Obráběným materiálem je austenitická korozivzdorná ocel, která byla blíže představena v kapitole 3.1.2. Materiál byl ve formě tyčí tažených za studena. Byly použity tyče dvou průměrů. Pro lepší přehlednost jsou v následujících dvou tabulkách opět vypsány chemické složení (tab. 4.1) a mechanické vlastnosti oceli (tab. 4.2).

Tab. 4.1 Chemické složení oceli ČSN 41 7346 (X5CrNiMo17-12-2) [47].

Chemické složení [hm. %]								
C max.	Si max.	Mn max.	P max.	S	Cr	Ni	Mo	N max.
0,07	1,00	2,00	0,045	0,012÷0,03	16,5÷18,5	10,0÷13,0	2,0÷2,5	0,11

Tab. 4.2 Mechanické vlastnosti oceli ČSN 41 7346 (X5CrNiMo17-12-2) [47].

R _{p0,2} min. [MPa]	R _m [MPa]	A ₅₀ min. [%]
560	700÷850	20

4.2 Řezný nástroj

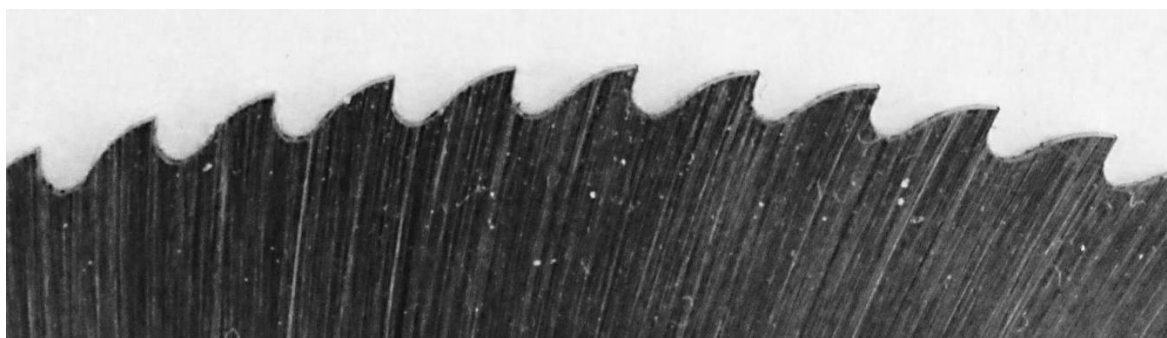
Na základě poznatků z firmy fischer Vyškov, s.r.o., se ukázalo, že nejlepším kotoučem pro řezání hmoždinek je kotouč z materiálu s označením Emo5 o průměru 100 mm se 100 zuby (obr. 4.1). Vhodnějším tvarem zubů je typ B (obr. 4.2), typ zubů BW by pro tloušťku kotouče 1 mm neměl význam. Pilové kotouče jsou vyráběny firmou GSP-High Tech Saws, s.r.o. Dle zkušeností z praxe jsou kotouče broušeny s ortogonálním úhlem čela $\gamma_0 = 14^\circ$ a ortogonálním úhlem hřbetu $\alpha_0 = 10^\circ$. V tab. 4.3 je sepsáno chemické složení rychlořezné oceli, použité pro výrobu pilových kotoučů.

Tab. 4.3 Chemické složení oceli DIN 1.3243 [8].

Chemické složení [hm. %]								
C	Si	Mn	Cr	Mo	V	W	Co	Fe
0,92	0,4	0,3	4,1	5,0	1,9	6,4	4,8	76,18



Obr. 4.1 Nepovlakovaný pilový kotouč 100×1.0×22 100B z materiálu s označením Emo5.



Obr. 4.2 Tvar zubů B pilového kotouče.

Povlakování provedla firma SHM, s.r.o., kde proběhla také předpovlakovací úprava kotoučů. Pro experiment bylo použito šest pilových kotoučů:

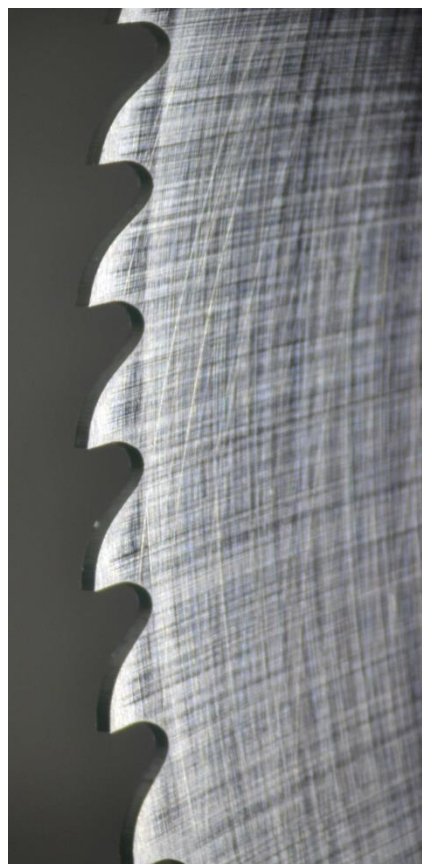
- nepovlakovaný neodjehlený pilový kotouč,
- nepovlakovaný odjehlený pilový kotouč,
- pilový kotouč s povlakem TiCN MP,
- pilový kotouč s povlakem ALWIN,
- pilový kotouč s povlakem TripleCoating Cr,
- pilový kotouč s povlakem BIGAAN.

Na obr. 4.3 a obr. 4.5 jsou snímky kotouče dodávaného společností GSP- High Tech Saws, s.r.o. Nástroje jsou ve stavu, kdy po broušení zubů zůstávají otřepy jak na ostří, tak na boku kotoučů. Vzhledem k těmto skutečnostem se může stát, že při obrábění budou zuby s většími otřepy vykazovat silové skoky. Firma SHM, s.r.o. byla požádána, aby jeden z nepovlakovaných kotoučů otřepů zbavila (obr. 4.4 a obr. 4.6). Experiment proto bude mít za úkol mimo jiné ukázat vliv odjehlení a hlavně vliv řízeného zaoblení ostří na silový průběh při obrábění. Nástroje je možno v konečné fázi výroby kartáčovat, ale z důvodu jejich tvrdosti dochází k velké spotřebě kartáčovacích nástrojů, což se nepříznivě projeví na ceně kotouče.

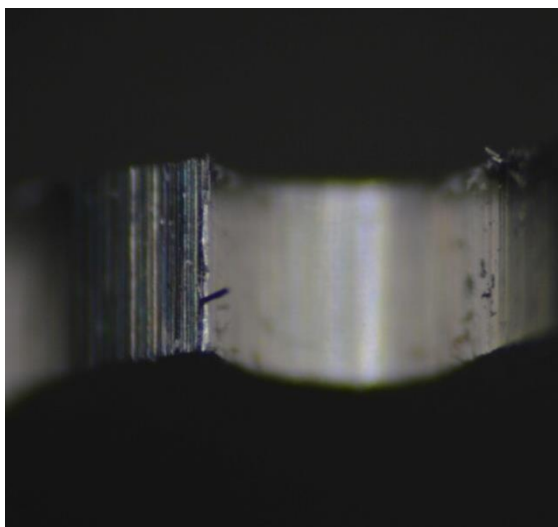
Vzhledem k velikosti otřepů by se při možné další spolupráci na povlakování kotoučů musel způsob odjehlení ve firmě SHM, s.r.o. optimalizovat [83].



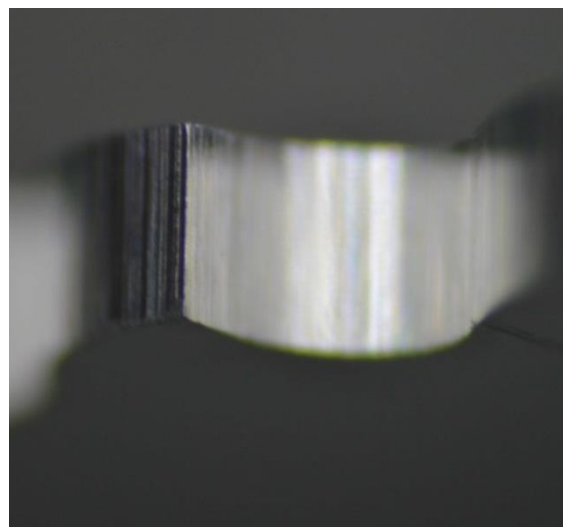
Obr. 4.3 Boky zubů před úpravou [83].



Obr. 4.4 Boky zubů po úpravě [83].



Obr. 4.5 Zuby před úpravou [83].



Obr. 4.6 Zuby po úpravě [83].

Z ekonomických a logistických důvodů se po dosažení trvanlivosti kotoučů, následně přebroušují přímo ve firmě fischer Vyškov, s.r.o. Je jisté, že po přebroušení nebudou čelo, ani hřbet zubu kotouče chráněny deponovaným povlakem. Předpokládá se ale příznivý vliv povlaku, který zůstal na bocích kotoučů i po přebroušení. Jeho přínos by spočíval v redukci tření kotouče v řezné spáře a nalepování materiálu na boky zubů. Snímky použitých pilových kotoučů jsou v PŘÍLOZE 1.

Před samotným započítáním experimentu byly ověřeny průměry pilových kotoučů a jejich axiální házivost, která mohla být ovlivněna povlakovacím procesem. Naměřené hodnoty jsou v tab. 4.4.

Tab. 4.4 Naměřené hodnoty průměrů a axiální házivosti jednotlivých řezných nástrojů.

Pilový kotouč	Průměr [mm]	Axiální házivost [mm]
Nepovlakovaný neodjehlený pilový kotouč	100,23	0,05
Nepovlakovaný odjehlený pilový kotouč	99,83	0,03
Pilový kotouč s povlakem TiCN MP	100,46	0,09
Pilový kotouč s povlakem ALWIN	100,47	0,08
Pilový kotouč s povlakem TripleCoating Cr	100,14	0,07
Pilový kotouč s povlakem BIGAAN	100,10	0,07

Výrobce kotoučů v interních tolerancích předepisuje tyto hodnoty [84]:

tolerance průměru pilových kotoučů	$\varnothing 100 \pm 0,7 \text{ mm (js15)}$,
maximální radiální házivost pilových kotoučů	0,1 mm,
maximální axiální házivost pilových kotoučů	0,16 mm.

Vzhledem k naměřeným hodnotám a hodnotám předepsaných výrobních tolerancí je možné všechny kotouče definovat jako vyhovující, a to i po procesu povlakování. Lze tedy předpokládat, že proces povlakování nemá na házivost kotouče výrazný vliv.

4.3 Obráběcí stroje

Obráběcí stroje jsou součástí strojového parku Ústavu strojírenské technologie na FSI VUT v Brně. Prvním strojem je tříosá nástrojářská frézka FNK 25 A (obr. 4.7), jejíž parametry jsou uvedeny v tab. 4.5. Jako příslušenství k tomuto stroji byly použity dělička a koník, obojí upnuté na pracovním stole stroje.

Tab. 4.5 Technické parametry stroje FNK 25 A [85].

Vnější rozměry pracovní plochy	250 × 1250 mm
Maximální zatížení pracovní plochy	200 kg
Dutina ve vřetenu	ISO 30
Rozsah otáček vřetene	56 ÷ 4500 min ⁻¹
Rychlost pracovních posuvů (X, Y, Z)	14 ÷ 630 mm.min ⁻¹
Výkon elektromotoru pro pohon vřetene	2,5 kW



Obr. 4.7 Nástrojářská frézka FNK 25 A.

Druhým použitým strojem je pětiosé portálové obráběcí centrum TAJMAC-ZPS MCV 1210 (obr. 4.8). Předností stroje je možnost obrábět složité tvary. Vzhledem k vysoké tuhosti a tlumícím vlastnostem konstrukce je možno používat i HSC technologie obrábění [86]. Technické parametry stroje jsou uvedeny v tab. 4.6.

Tab. 4.6 Technické parametry stroje TAJMAC-ZPS MCV 1210 [87].

Vnější rozměry pracovní plochy	1200 × 1000 mm
Maximální zatížení pracovní plochy	3000 kg
Upínací kužel	HSK - A 63
Rozsah otáček vřetene	0 ÷ 18 000 min ⁻¹
Rychlost pracovních posuvů (X, Y, Z)	20 m.min ⁻¹
Výkon elektromotoru pro pohon vřetene	30 kW



Obr. 4.8 Obráběcí centrum MCV 1210.

4.4 Řezné podmínky

Při volbě řezných podmínek se vycházelo ze dvou podkladů, z testování pilových kotoučů, které už na fakultě proběhly a z katalogových hodnot výrobců kotoučových pil [12,54,55,56,57]. Podmínky byly zvoleny s ohledem na to, že se řeže plný materiál, kotoučem, jehož zubová rozteč tomuto není přizpůsobená. Ve velmi malém prostoru mezi zuby dochází ke značnému pěchování třísky, což může vést až k vylomení zubu. Zvolené řezné podmínky, které byly diskutovány s firmou GSP- High Tech Saws, s.r.o. [88] jsou v tab. 4.7. Hodnoty řezné rychlosti a otáček vřetene, které jsou v závorce, byly použity na nástrojářské frézce FNK 25 A, protože má pohon vřetena realizován pomocí řemenů a volí pouze určité otáčkové řady (není možná plynulá změna otáček). Řezání probíhalo se dvěma zuby v záběru.

Tab. 4.7 Zvolené řezné podmínky.

Řezný parametr	Označení parametru	Hodnota parametru
Řezná rychlost	v_c	25 (28) m.min ⁻¹
Otáčky vřetene	n	80 (90) min ⁻¹
Posuv na zub	f_z	0,02 mm
Posuvová rychlost	v_f	160 mm.min ⁻¹
Radiální hloubka záběru	a_e	0,5 mm
Axiální hloubka záběru	a_p	1 mm

4.5 Průběh experimentu

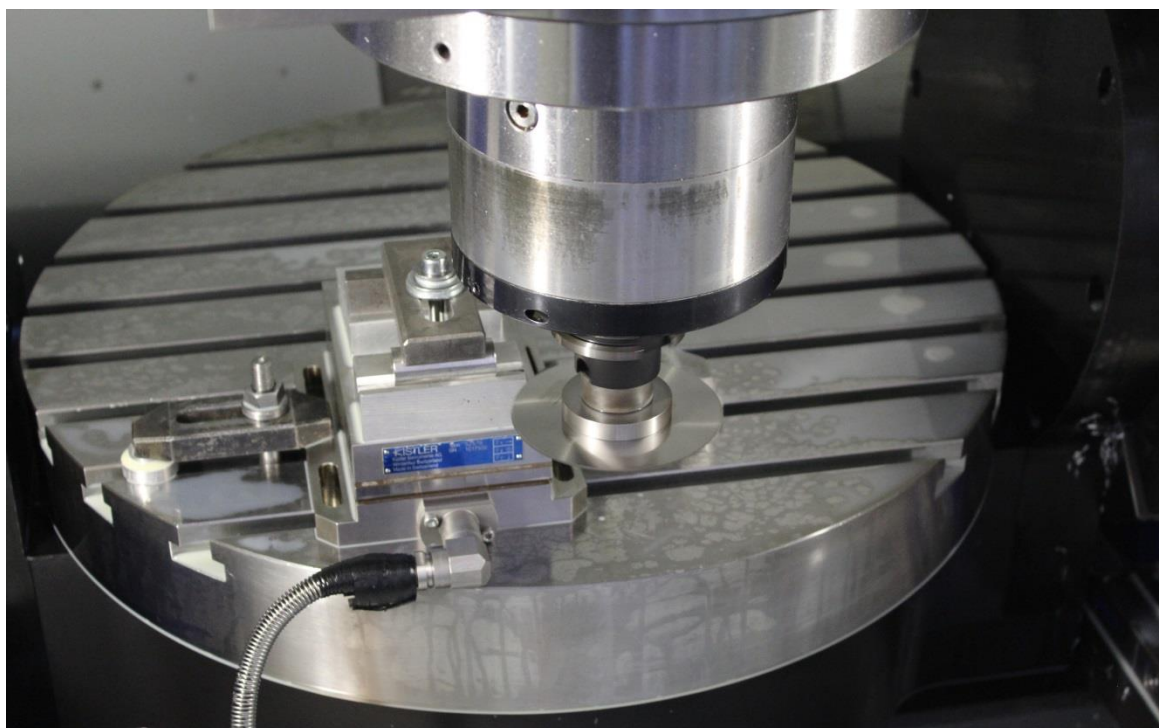
Zkušební materiál ve formě tyče o průměru 19,5 mm a délce 50 mm byl pomocí prizmatické podložky, šroubu a upínky upnut na pracovní plochu dynamometru KISTLER 9257B (obr. 4.9). Pomocí měřicí sondy a natočení pracovního stolu byla prizmatická podložka ustavena do souřadného systému dynamometru. Pohyb podložky byl zamezen dvojicí šroubů. Dynamometr byl připevněn pomocí upínek na pracovní plochu stroje TAJMAC-ZPS MCV 1210. Takto připravená aparatura slouží k měření silového zatížení nástroje při řezání.

Na loži stroje FNK 25 A byla upnuta dělička a koník (obr. 4.10). Do sklíčidla děličky byla upnuta tyč, která byla na druhém konci podepřena hrotem. Tato sestava sloužila k řezání materiálu bez měření silového zatížení, aby nebyl dynamometr zbytečně namáhán. Tyč byla rozdělena na určitý počet podélných řezů, kdy rotační pohyb mezi jednotlivými řezy byl vykonáván pomocí děličky. Podélný řez byl vždy na středu tyče, aby bylo dosaženo maximálního průřezu třísky. Obrábění bylo u obou strojů sousledné s řeznými podmínkami z tab. 4.7.

Řezný nástroj byl upnut pomocí speciálního upínacího trnu HSK-A63D22 A60. Pilový kotouč byl vložen mezi dvě příruby a dotažen maticí. Na obou strojích probíhalo obrábění s přívodem polosyntetické emulze.

První průjezd řezného nástroje proběhl na stroji TAJMAC-ZPS MCV 1210, kde se měřilo silové zatížení nového nástroje. Vzhledem k nestejným řezným průměrům pilových kotoučů (tab. 4.4) byly při každém měření vykonány dva průjezdy nástroje, přičemž pouze druhý byl měřen pomocí dynamometru. První řez (neměřený) měl za úkol vyrovnat rozdílné průměry, kdy hodnota a_e byla napočítána a zadána do CNC programu tak, aby každý kotouč odebíral v radiálním směru cca 0,3 mm. Při druhém měřeném průjezdu byla k y-ové hodnotě zapsané v CNC programu přičtena hodnota 0,5 mm, tím byl zajištěn vždy stejný průřez třísky při měření silového zatížení. Nedocházelo tedy k nastavování nulové hodnoty v ose y (na průměru obrobku) pro každý pilový kotouč. Po těchto dvou průjezdech došlo k pootočení zkušební vzorku.

Následně byl řezný nástroj upnut na nástrojářské frézce FNK 25 A, kde proběhlo řezání k rozvinutí opotřebení nástroje. V další fázi bylo opět změřeno silové zatížení nástroje a byla změřena šířka fazetky opotřebení na hřbetě nástroje (VB).



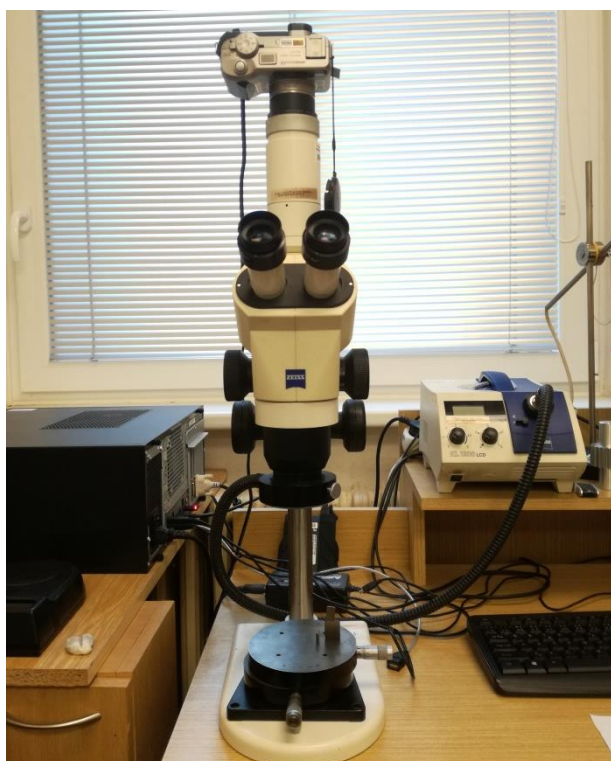
Obr. 4.9 Průběh experimentu na stroji TAJMAC-ZPS MCV 1210.



Obr. 4.10 Průběh experimentu na stroji FNK 25 A.

4.6 Způsob měření opotřebení

Opotřebení bylo měřeno pomocí stereo mikroskopu STEMI 2000-C Zeiss (obr. 4.11). Na pracovní ploše mikroskopu byl použit přípravek s funkcí křížového stolu, pro odečítání hodnot opotřebení VB. Kotouč byl ustaven pomocí magnetu a plastické hmoty, úhelníkem byla zajištěna jeho kolmost k pracovní ploše. Ryska v objektivu mikroskopu byla nastavena totožně s hranou ostří. Pomocí otáčení šroubu byla ryska přesunuta na aktuální hodnotu VB. Velikost opotřebení odpovídalo vzdálenosti mezi ryskami, která se dala odečíst na číselníku šroubu. Pomocí mikroskopu byly pořízeny i fotografie obr. 4.13 až 4.18, které zachycují řezný nástroj jako nový, a po experimentu.



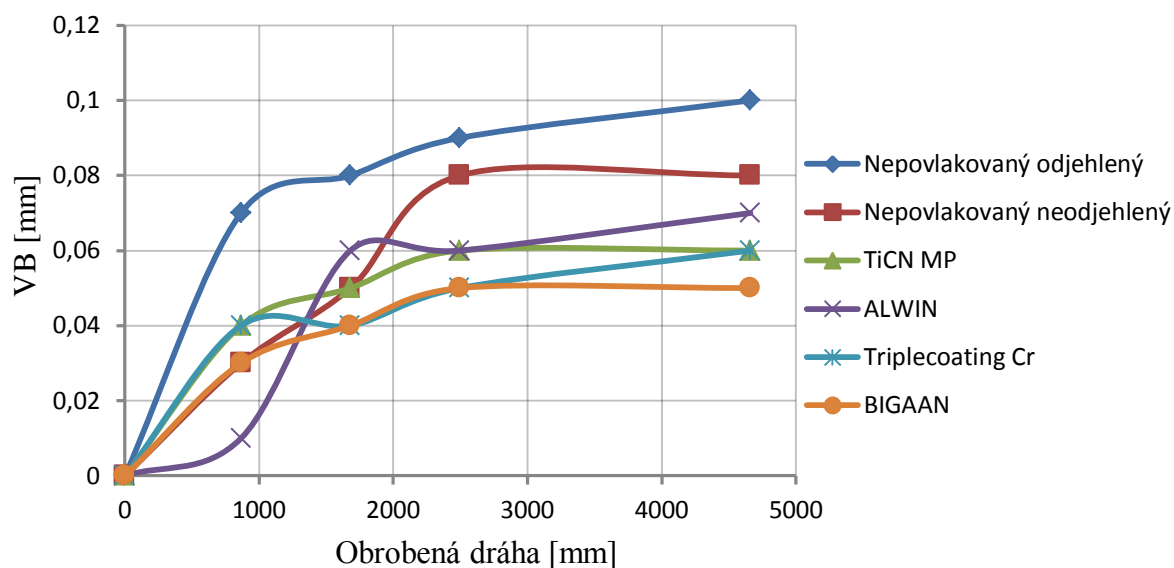
Obr. 4.11 Stereo mikroskop STEMI 2000C Zeiss s přípravkem.

4.7 Vyhodnocení opotřebení nástroje

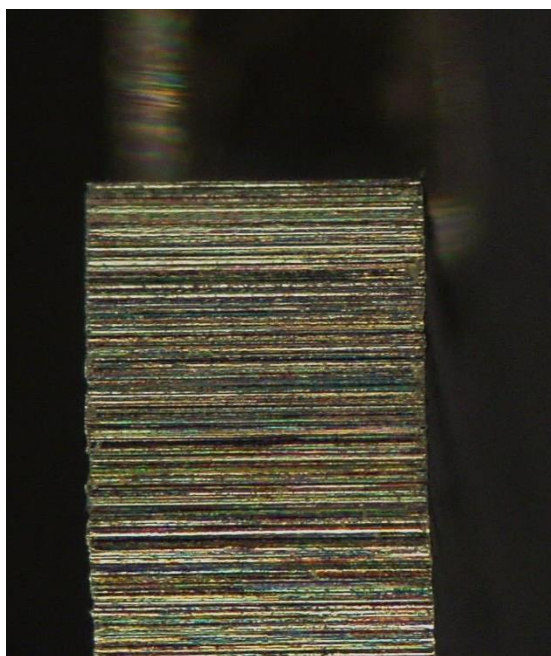
Na následujícím grafu je znázorněn průběhy šířky fazetky opotřebení na hřbetech zubů jednotlivých nástrojů v závislosti na obrobené dráze (obr. 4.12). Na grafu lze pozorovat typický průběh opotřebení VB, kdy na začátku je prudký nárůst hodnot vlivem opotřebovávání nového nástroje. Experiment byl ukončen po dráze obrábění 4 660 mm, což pro průběh opotřebení VB představovalo lineární část, kdy je řezný nástroj opotřebováván rovnoměrně.

Na obr. 4.13, obr. 4.14 a obr. 4.16 je vidět plastická deformace, která je především na bocích zubů, kde bok nástroje třel v řezné spáře a byl vyvinut dostatek tepla pro její realizaci. Nejvýrazněji je zachycena na obr. 4.14, kde je na levé straně hřbetu zubu vytvořen otřep z plastifikovaného materiálu. Hřbetní opotřebení je průvodním jevem při každém třískovém obrábění, takže i zde je možné vidět lesklé plochy na hřbetech zubu, které však nenabývají větších rozsahů a často jsou zakryty pod ulpěným materiálem

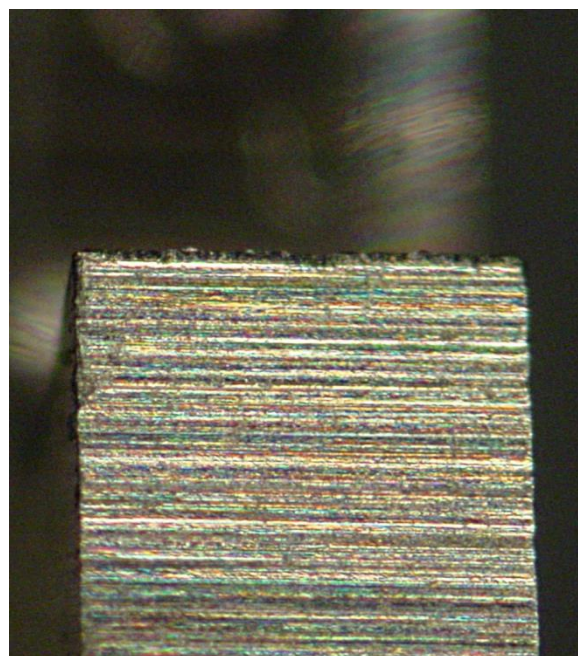
obrobku. Nejmenší hodnotu VB měl nástroj s povlakem BIGAAN, největší hodnotu nepovlakovaný odjehlený nástroj.



Obr. 4.12 Průběhy opotřebení VB jednotlivých řezných nástrojů.

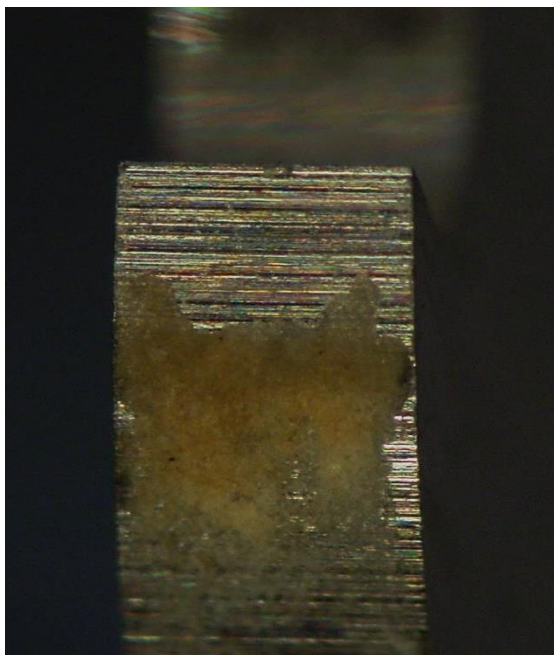


Hřbet zubu před experimentem.

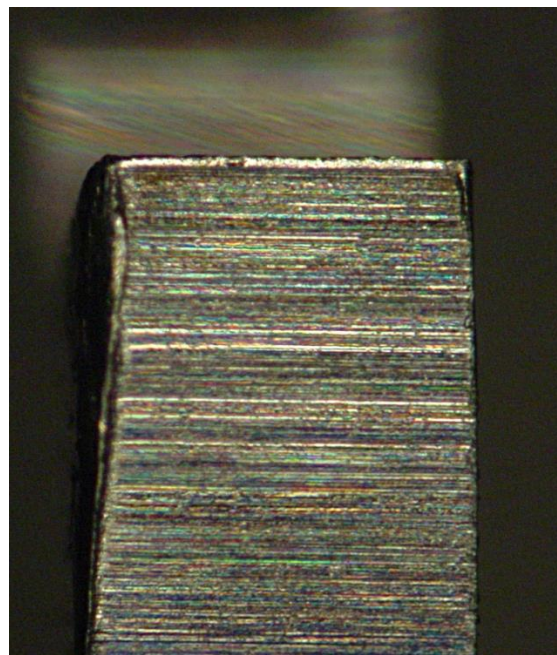


Hřbet zubu po experimentu.

Obr. 4.13 Hřbet zubu neodjehleného nepovlakovaného řezného nástroje před a po experimentu.

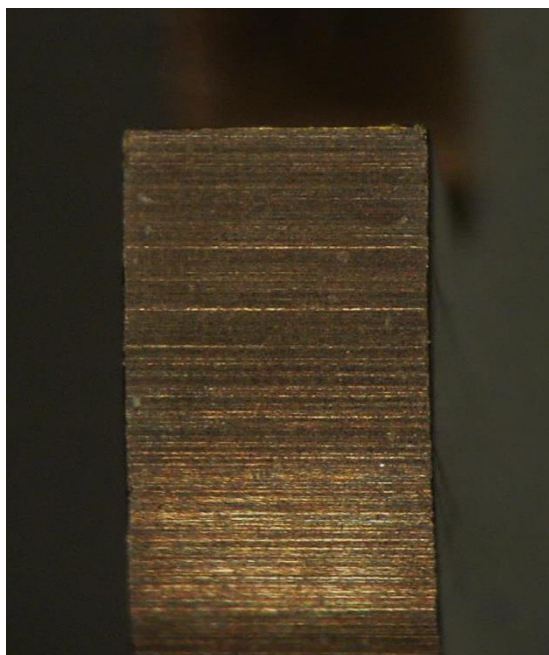


Hřbet zubu před experimentem.

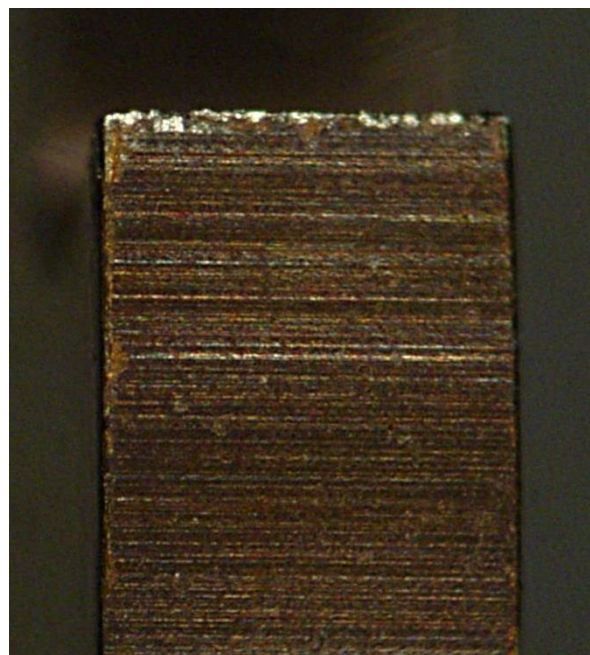


Hřbet zubu po experimentu.

Obr. 4.14 Hřbet zubu odjehleného nepovlakovaného řezného nástroje před a po experimentu.



Hřbet zubu před experimentem.

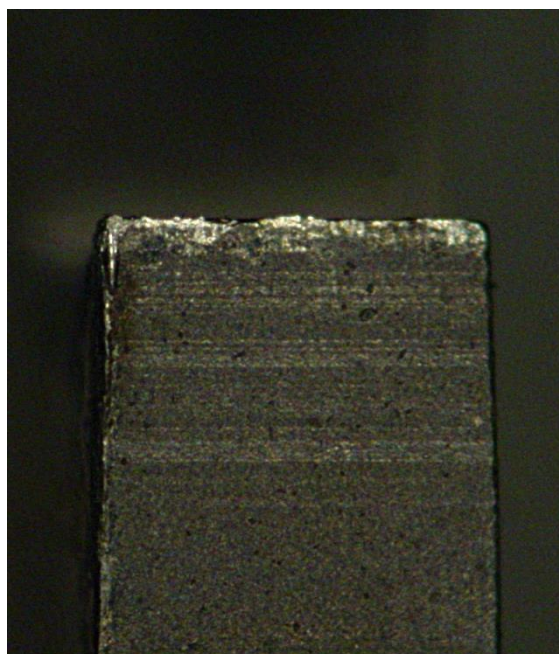


Hřbet zubu po experimentu.

Obr. 4.15 Hřbet zubu řezného nástroje s povlakem TiCN MP před a po experimentu.

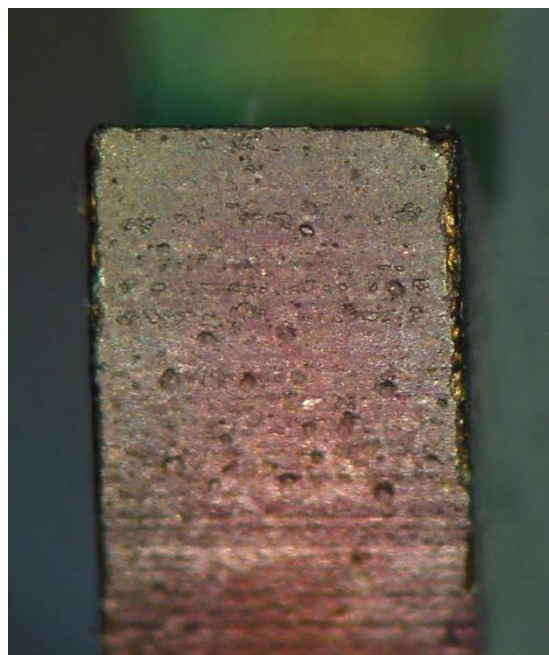


Hřbet zubu před experimentem.

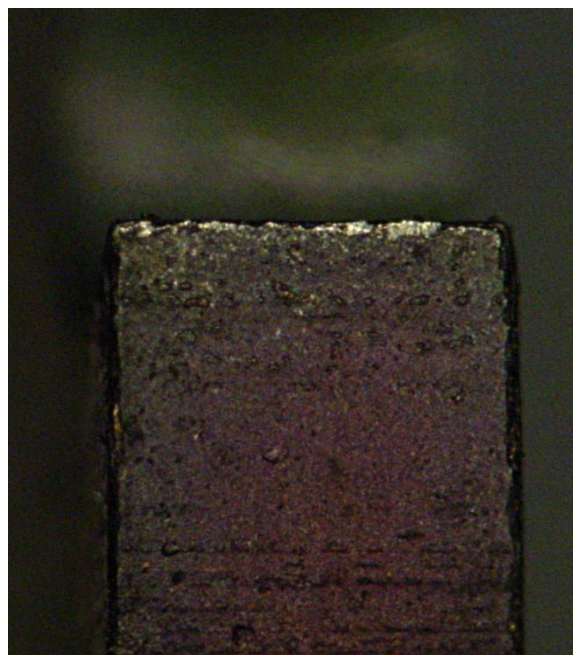


Hřbet zubu po experimentu.

Obr. 4.16 Hřbet zubu řezného nástroje s povlakem ALWIN před a po experimentu.

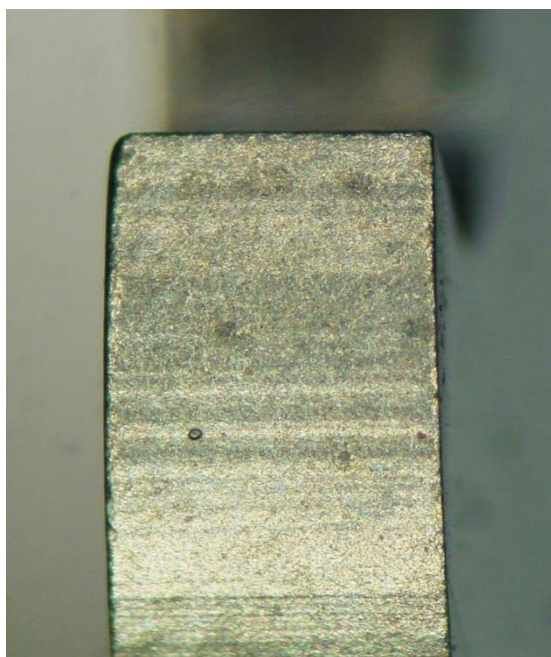


Hřbet zubu před experimentem.

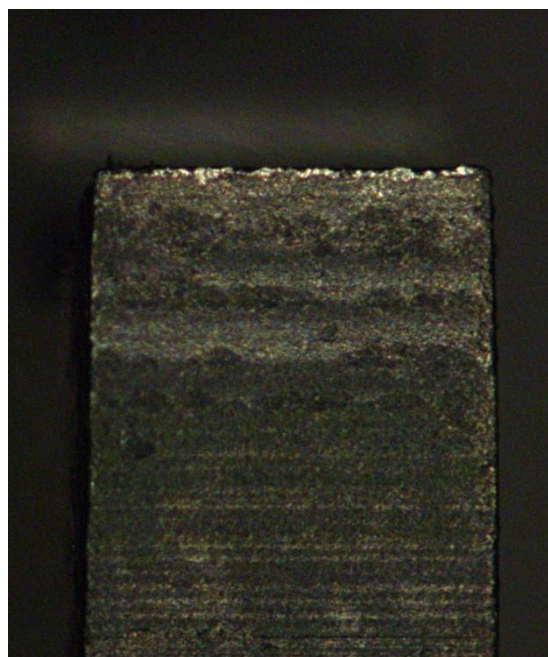


Hřbet zubu po experimentu.

Obr. 4.17 Hřbet zubu řezného nástroje s povlakem TripleCoating Cr před a po experimentu.



Hřbet zubu před experimentem.



Hřbet zubu po experimentu.

Obr. 4.18 Hřbet zubu řezného nástroje s povlakem BIGAAN před a po experimentu.

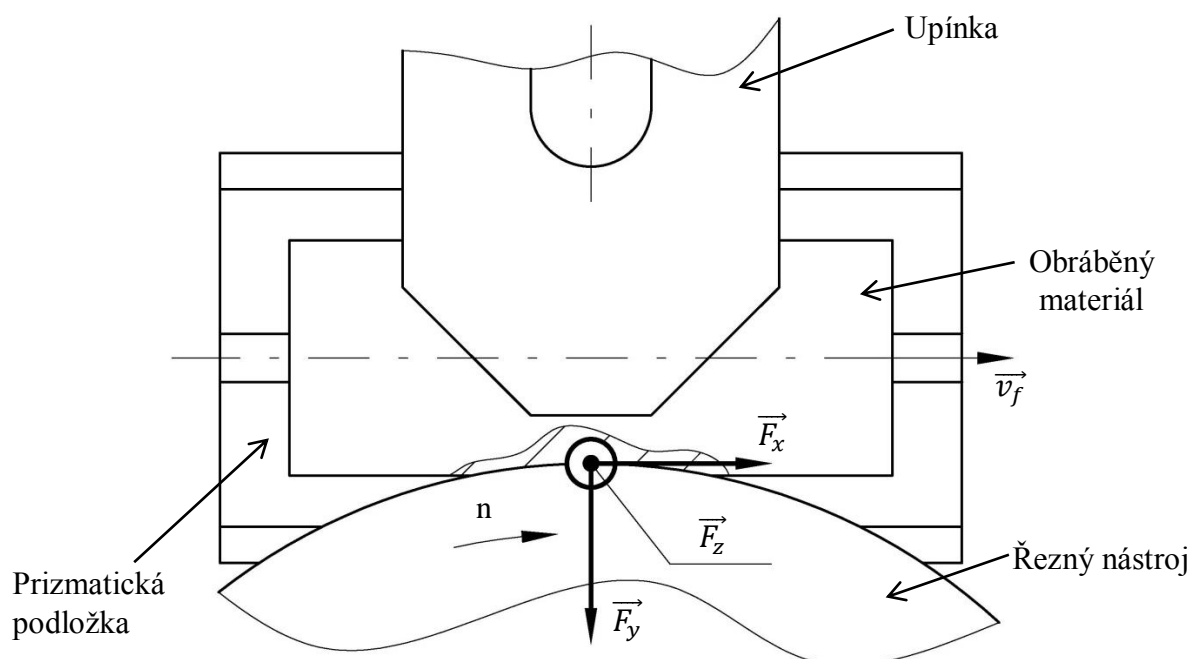
4.8 Způsob získávání silového záznamu

Data pro silovou analýzu byla získána měřením pomocí dynamometru KISTLER 9257B. Dynamometr využívá pro snímání silového zatížení piezoelektrický jev, který je vyvolán na povrchu křemíkového krystalu vlivem jeho mechanického zatížení silovou reakcí od odebrané třísky. Dynamometr je vybaven nábojovým zesilovačem KISTLER 5070A, který je řízený počítačem. Nastavená vzorkovací frekvence odpovídala hodnotě 1000 Hz. Schéma zapojení dynamometru je na obr. 4.19.



Obr. 4.19 Schéma zapojení dynamometru KISTLER [38].

Pomocí dynamometru byly snímány složky silového zatížení F_x , F_y a F_z , obr. 4.20. Tyto složky sil v konkrétních osách kartézského souřadného systému odpovídaly dle tab. 4.8 složkám celkové řezné síly.



Obr. 4.20 Schéma řezání na stroji TAJMAC-ZPS MCV 1210.

Tab. 4.8 Přiřazení sil k jednotlivým osám.

Název osy	Označení síly	Název síly
Osa x (F_x)	F_f	Posuvová síla
Osa y (F_y)	F_{fN}	Normálová posuvová síla
Osa z (F_z)	F_p	Pasivní síla

Pro záznam hodnot byl použit notebook se softwarem Dynoware, ze kterého byla získána data ve formátu .txt a dále zpracovávána v tabulkovém editoru Microsoft Excel. V programu byl proveden výpočet silové výslednice F podle vzorce (4.1).

Vztah pro výpočet **celkové síly** F (4.1) [4].

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \text{ [N]} \quad (4.1)$$

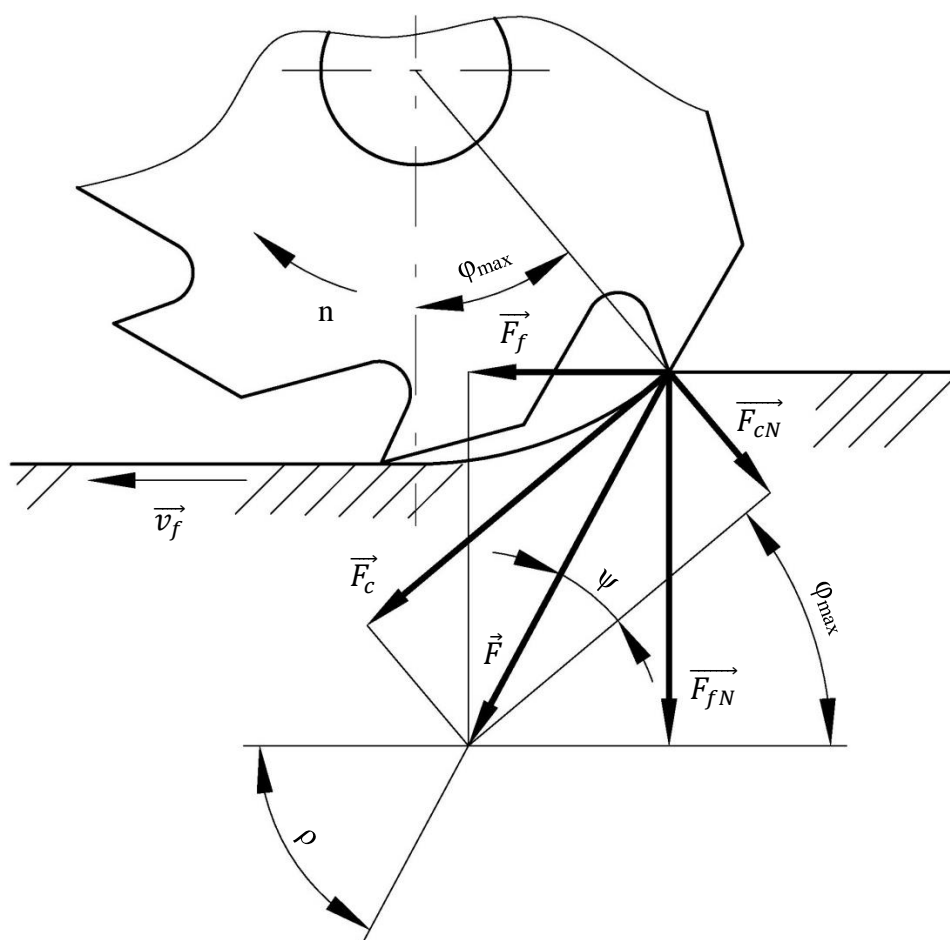
kde: F [N] - celková síla,
 F_x [N] - síla ve směru osy x,
 F_y [N] - síla ve směru osy y,
 F_z [N] - síla ve směru osy z.

Další úprava dat byla provedena na základě nové metodiky zpracování silového záznamu, která byla vypracována na Ústavu strojírenské technologie na FSI VUT v Brně panem prof. Ing. Miroslavem Piškou, CSc. Tato metoda [89] vyhodnocování ponechává trojice měřených sil – F_x , F_y , F_z a výslednici F v kartézském systému. Tyto síly jsou dále transformovány do ortogonálního technologického systému – F_c , F_{cN} , F_p .

Největší výhodou této metody je její relativně jednoduché zpracování, kdy není potřeba vyhodnocovat silové zatížení vztažené na největší průřez třísky, ale vyhodnocuje se celý soubor měřených hodnot. Odpadá tedy zdlouhavé a pracné filtrování hodnot.

V prvním kroku bylo provedeno seřazení trojic naměřených sil podle silové výslednice (F), se zachováním odpovídajících komponent. Tento krok byl proveden pro vypovídající vykreslení řezné síly F_c a normálové řezné síly F_{cN} .

Síly F_c a F_{cN} byly získány přepočtem v programu Microsoft Excel z naměřených hodnot a jejich silových výslednic. Metodika přepočtu hodnot je popsána níže, doplněná o schéma (obr. 4.21), na kterém jsou znázorněny počítané úhly.



Obr. 4.21 Schéma přepočtu do ortogonálního technologického systému.

Druhým krokem po seřazení naměřených hodnot je výpočet maximálního úhlu posuvového pohybu (1.12) a úhlu ρ (4.2), který mezi sebou svírají síly F_f a F_{fN} . Úhel ρ není konstantní a mění se podle aktuální polohy natočení pilového kotouče. Záporné znaménko před normálovou posuvovou silou ve vzorci (4.2) pouze mění kvadrant, ve kterém výpočet probíhá.

$$\rho = \tan^{-1} \left(\frac{-F_{fN}}{F_f} \right) \quad (4.2)$$

Tyto dva úhly jsou od sebe odečteny (4.3). Výsledkem je úhel ψ , který svírá síla F a F_c . Využitím vlastností pravoúhlého trojúhelníku (obr 4.21) a goniometrických funkcí, jsou dopočítány řezná složka F_c celkové síly a normálová řezná složka F_{cN} celkové síly dle vzorců (4.4) a (4.5).

$$\psi = \rho - \varphi_{max} \quad (4.3)$$

$$F_c = \cos \psi \cdot F \quad (4.4)$$

$$F_{cN} = \sin \psi \cdot F \quad (4.5)$$

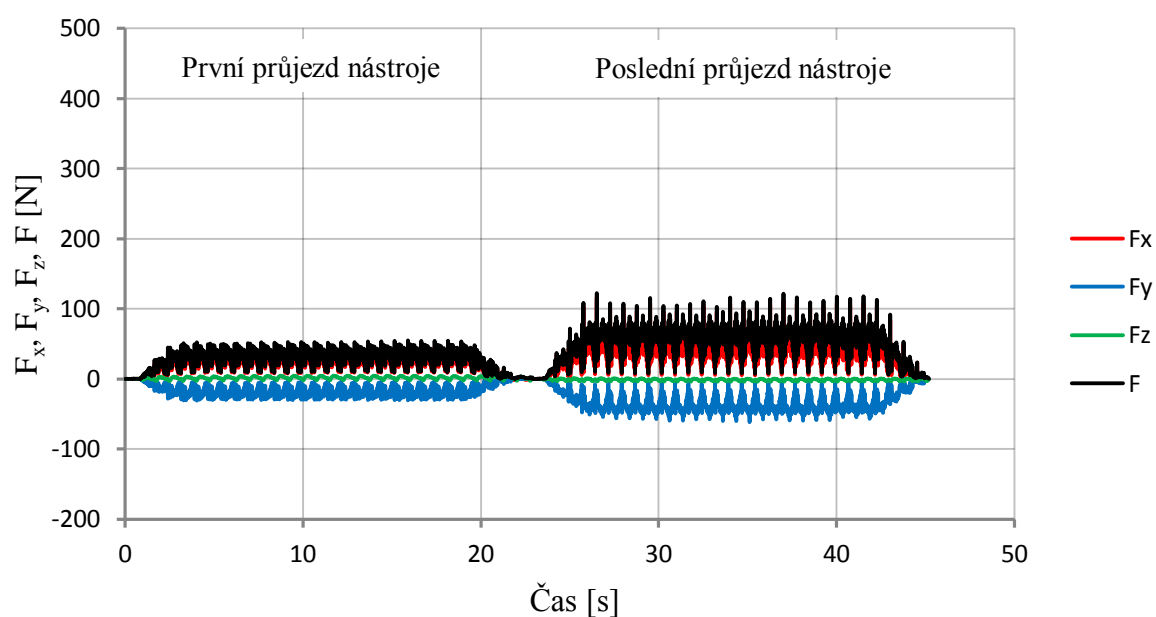
4.9 Vyhodnocení silového záznamu

Na následujících grafech obr. 4.22 až 4.39 jsou zobrazeny průběhy silového zatížení nástroje při prvním a při posledním měřeném průjezdu. Ke každému řeznému nástroji přísluší trojice grafů.

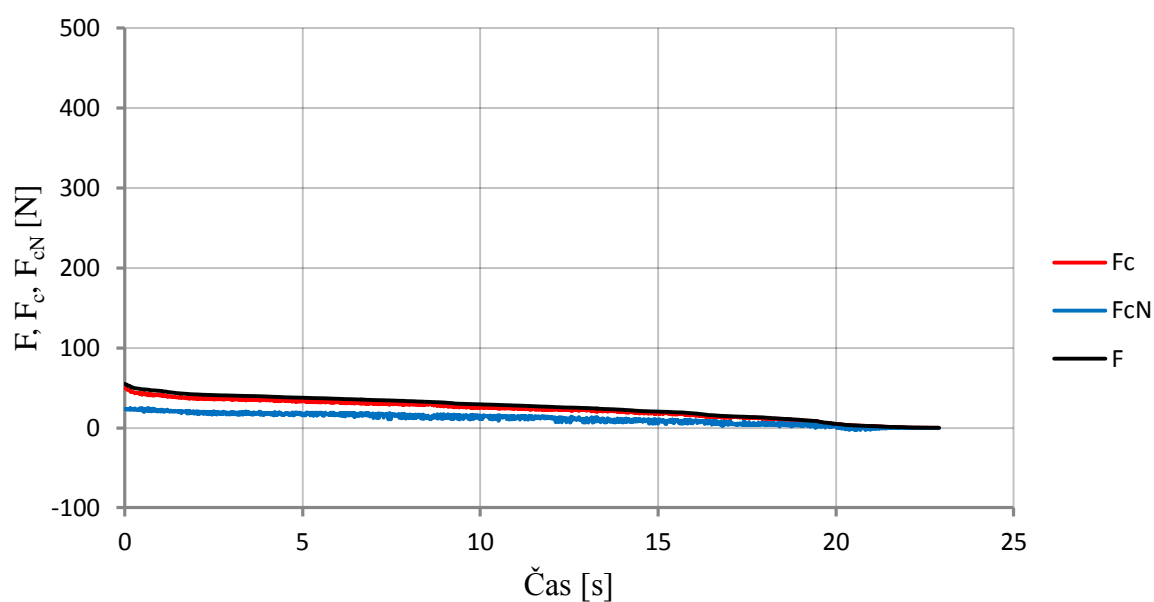
Úvodní graf zobrazuje průběhy sil F_x , F_y , F_z a F pro první a poslední měřený průjezd řezného nástroje. Průběhy jsou zobrazeny v grafu za sebou, z toho důvodu osa x, představující čas obrábění, neodpovídá reálným hodnotám.

Na zbylých dvou grafech je nejprve průběh sil F , F_c a F_{cN} pro první měřený průjezd a následně pro průjezd poslední. Hodnoty jsou seřazeny podle výslednice od největší, po nejmenší.

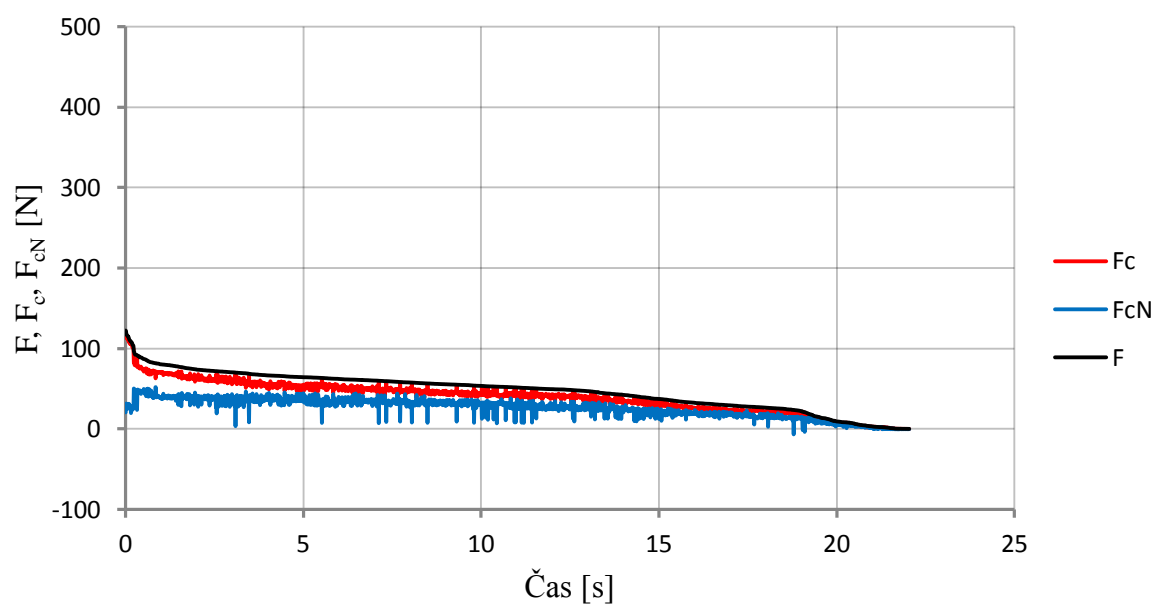
Grafické závislosti pro nepovlakovaný neodjehlený řezný nástroj



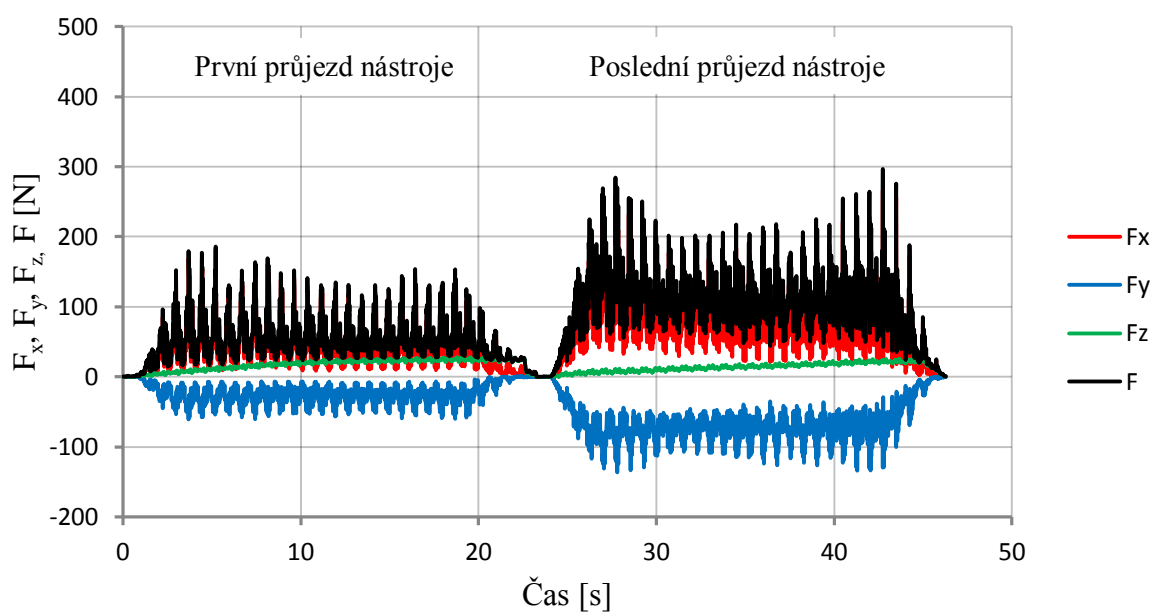
Obr. 4.22 Průběhy sil F_x , F_y , F_z a F pro první a poslední měřený průjezd nepovlakovaného neodjehleného řezného nástroje.



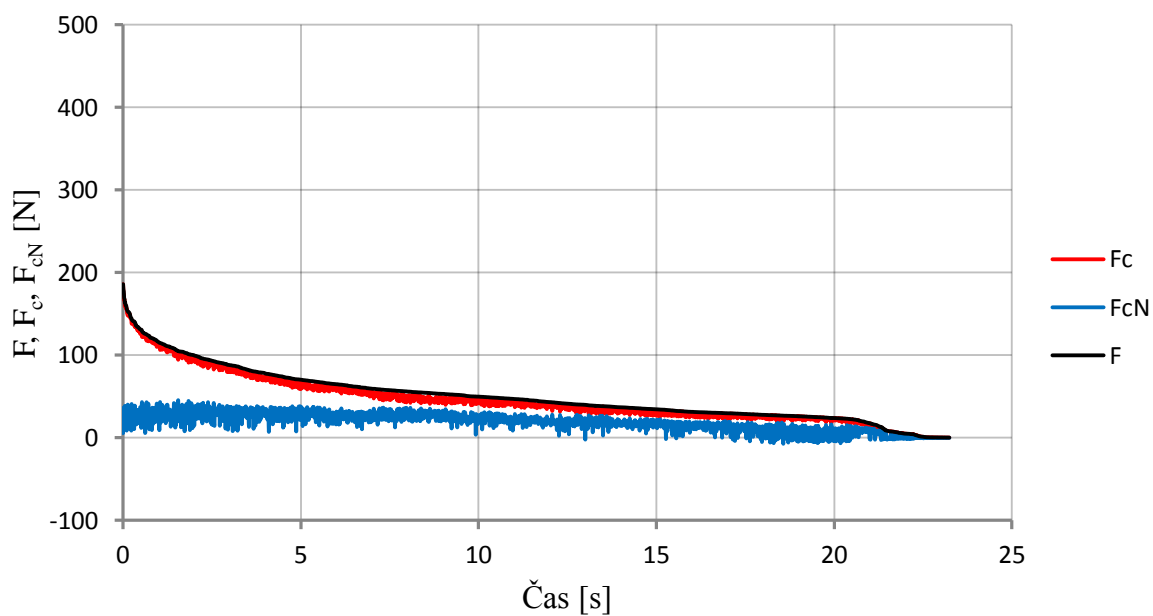
Obr. 4.23 Průběhy sil F , F_c a F_{cN} (seřazených podle výslednice), pro první měřený průjezd nepovlakovaného neodjehleného řezného nástroje.



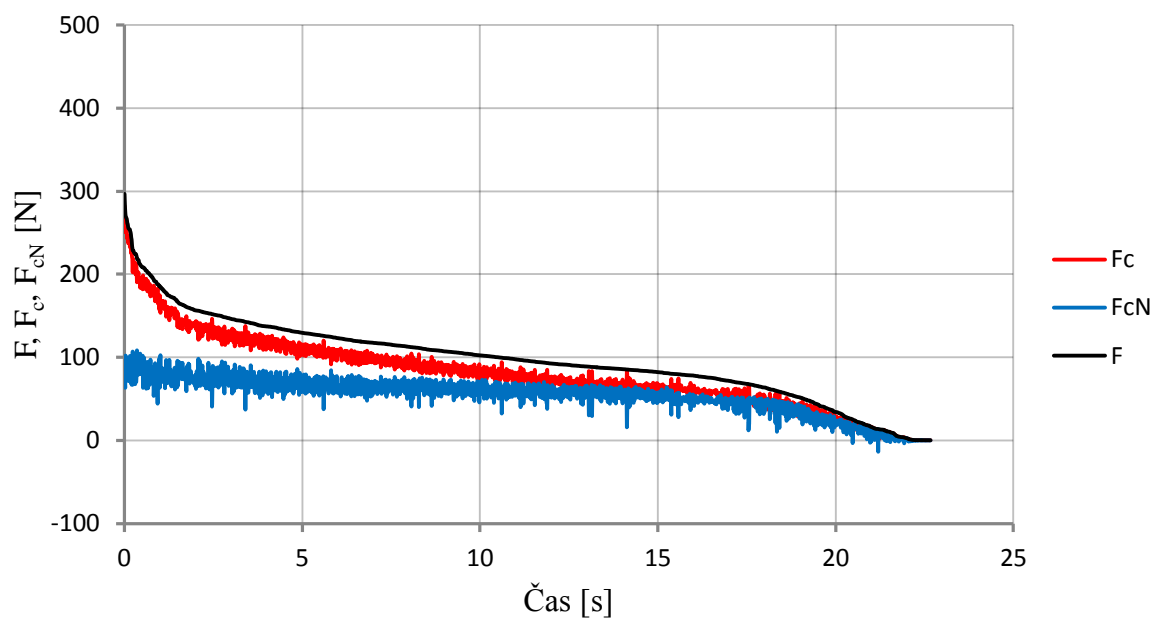
Obr. 4.24 Průběhy sil F , F_c a F_{cN} (seřazených podle výslednice), pro poslední měřený průjezd nepovlakovaného neodjehleného řezného nástroje.

Grafické závislosti pro nepovlakovaný odjehlený řezný nástroj

Obr. 4.25 Průběhy sil F_x , F_y , F_z a F pro první a poslední měřený průjezd nepovlakovaného odjehleného řezného nástroje.

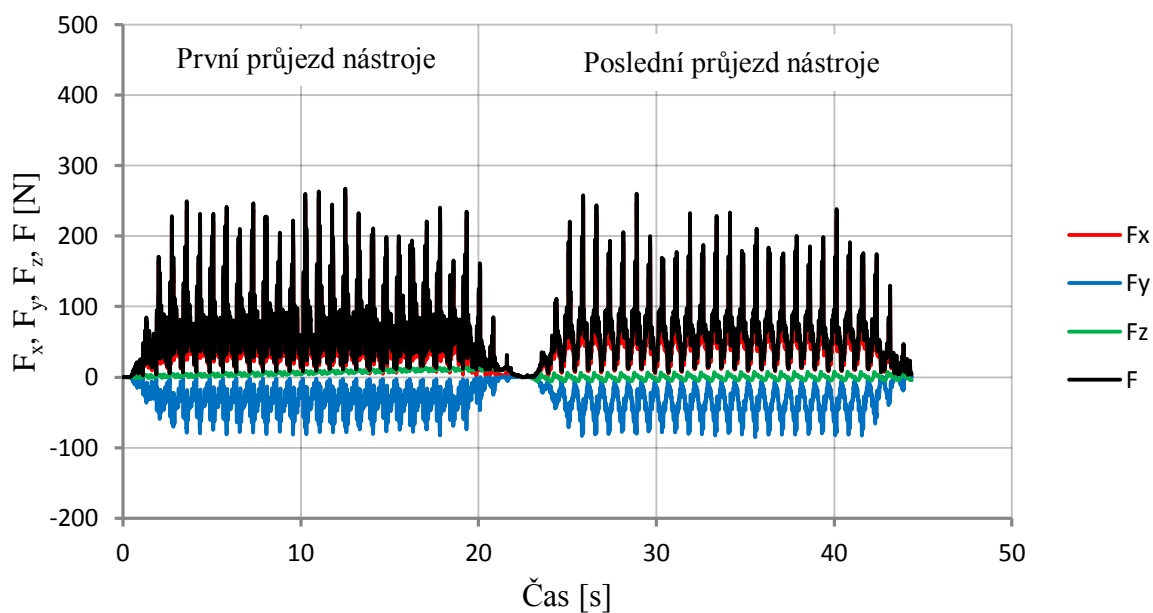


Obr. 4.26 Průběhy sil F , F_c a F_{cN} (seřazených podle výslednice), pro první měřený průjezd nepovlakovaného odjehleného řezného nástroje.

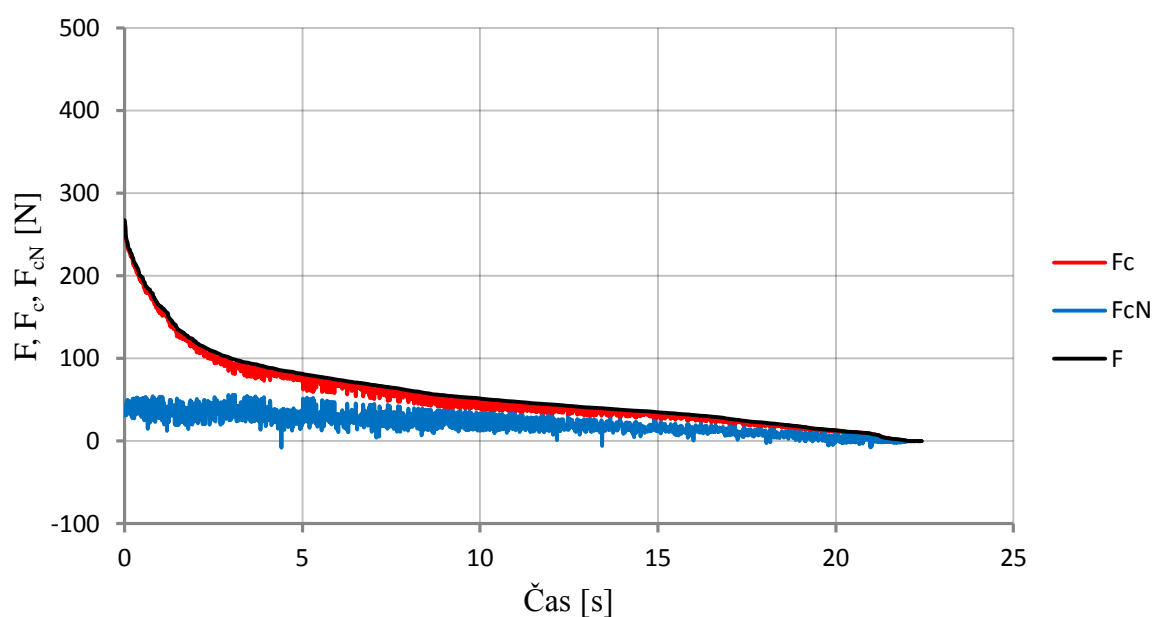


Obr. 4.27 Průběhy sil F , F_c a F_{cN} (seřazených podle výslednice), pro poslední měřený průjezd nepovlakovaného odjehleného řezného nástroje.

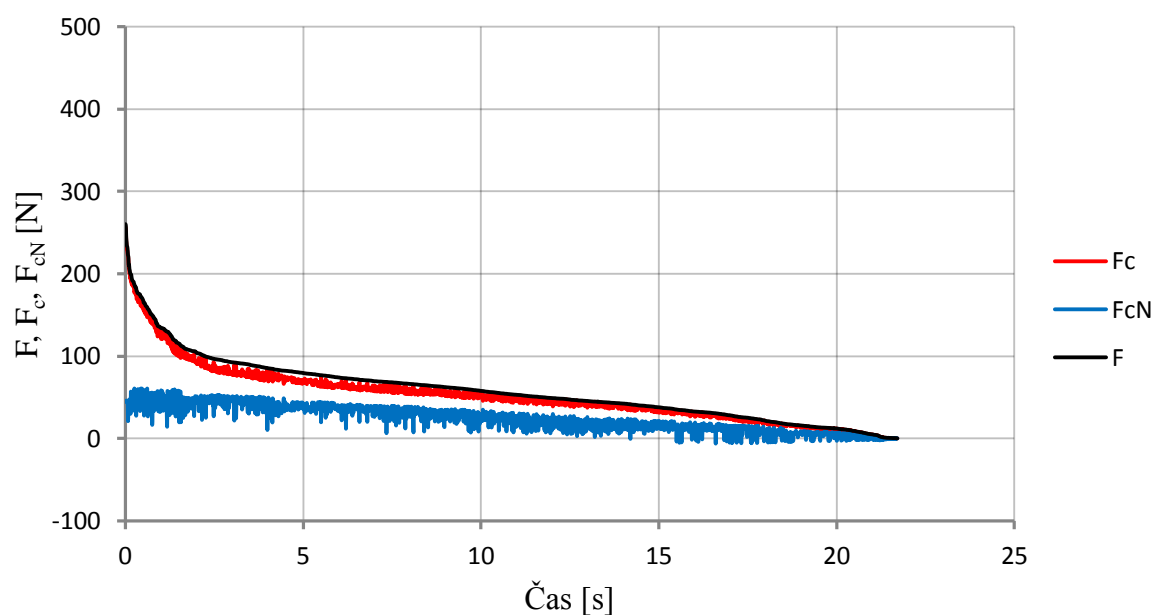
Grafické závislosti pro řezný nástroj s povlakem TiCN MP



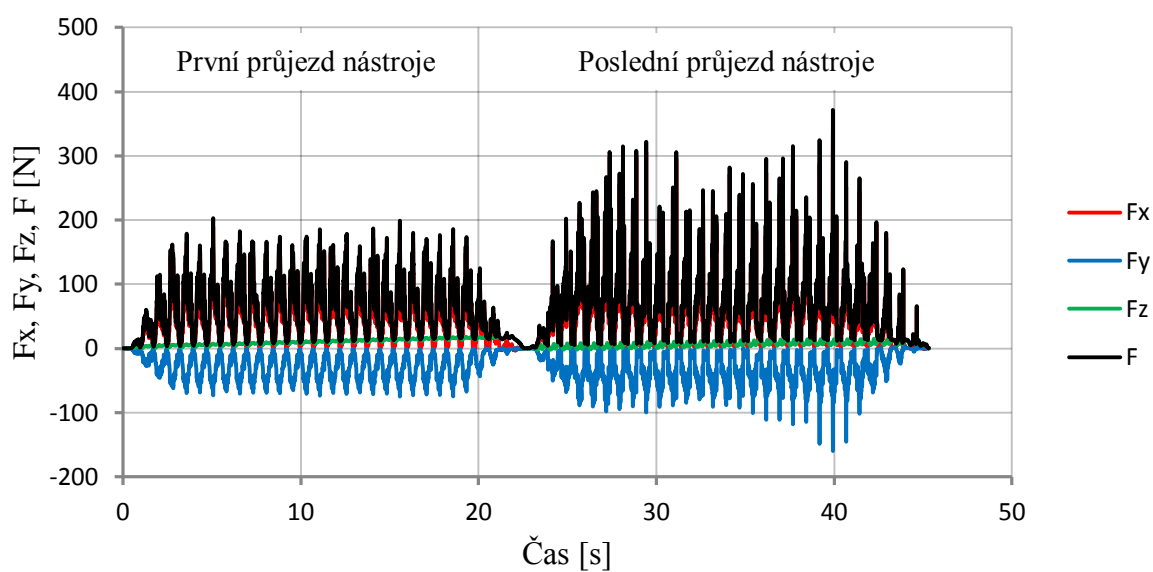
Obr. 4.28 Průběhy sil F_x , F_y , F_z a F pro první a poslední měřený průjezd řezného nástroje s povlakem TiCN MP.



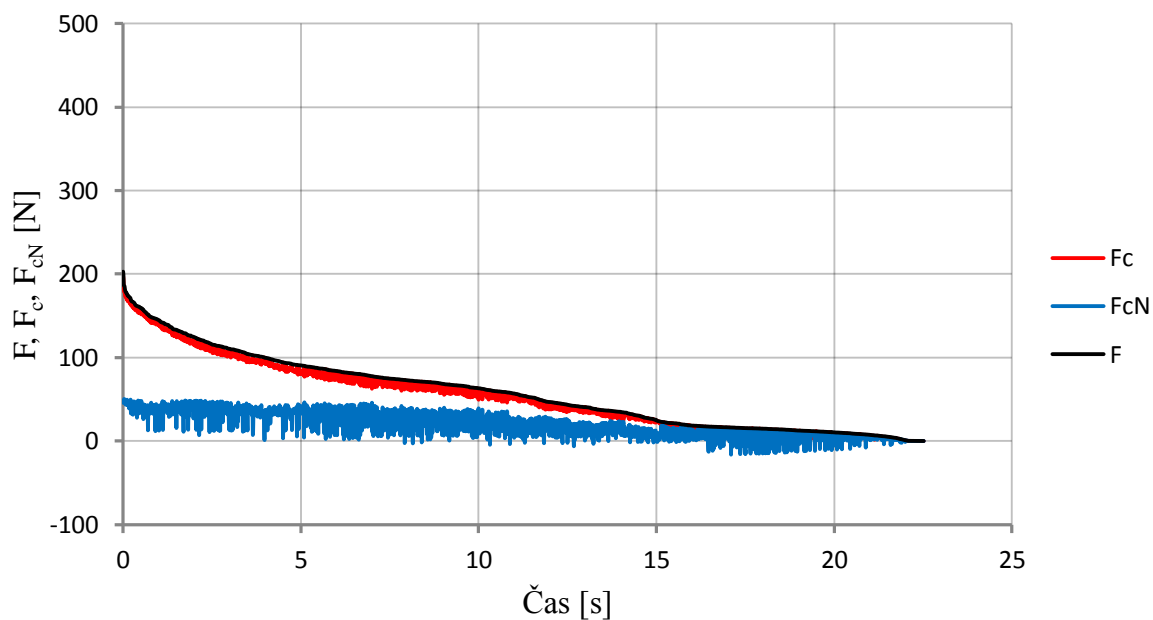
Obr. 4.29 Průběhy sil F , F_c a F_{cN} (seřazených podle výslednice), pro první měřený průjezd řezného nástroje s povlakem TiCN MP.



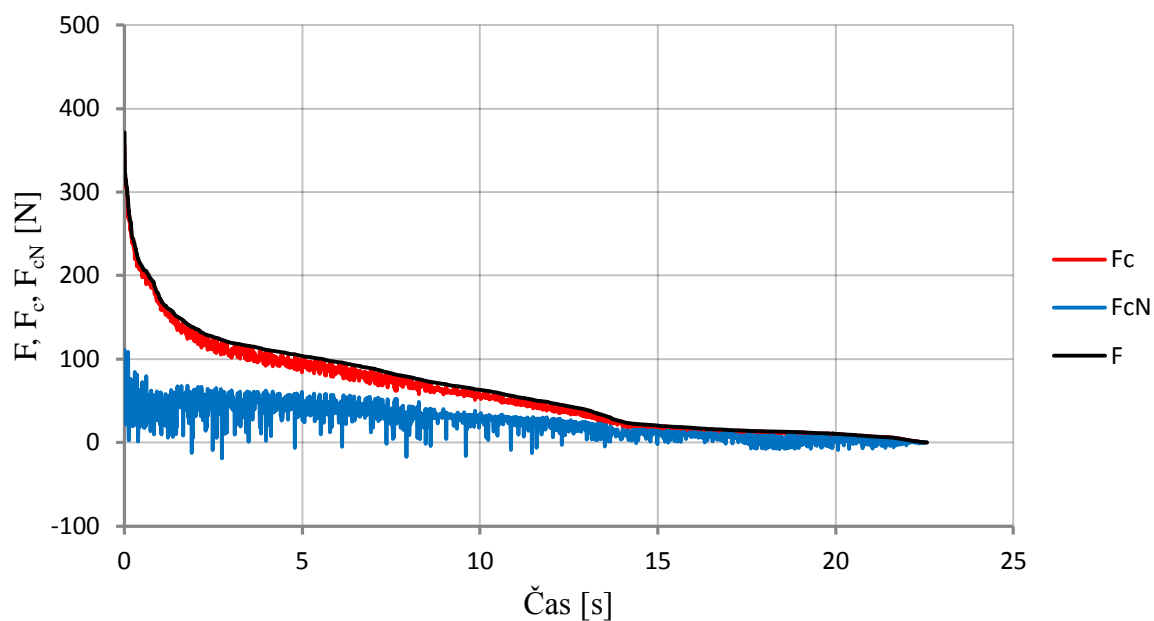
Obr. 4.30 Průběhy sil F , F_c a F_{cN} (seřazených podle výslednice), pro poslední měřený průjezd řezného nástroje s povlakem TiCN MP.

Grafické závislosti pro řezný nástroj s povlakem ALWIN

Obr. 4.31 Průběhy sil F_x , F_y , F_z a F pro první a poslední měřený průjezd řezného nástroje s povlakem ALWIN.

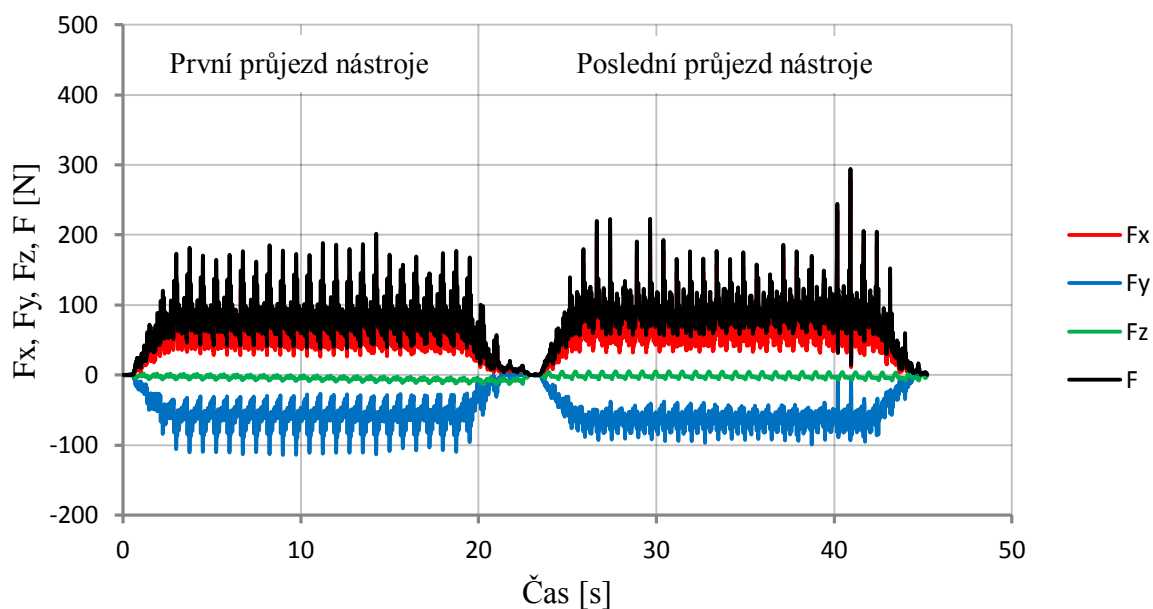


Obr. 4.32 Průběhy sil F , F_c a F_{cN} (seřazených podle výslednice), pro první měřený průjezd řezného nástroje s povlakem ALWIN.

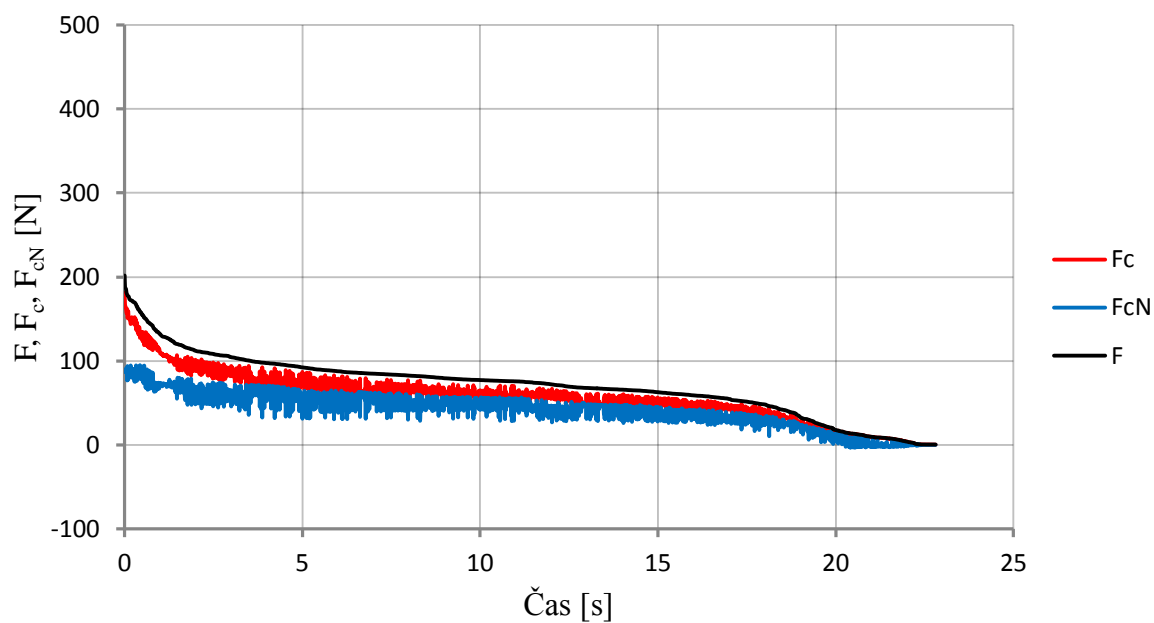


Obr. 4.33 Průběhy sil F , F_c a F_{cN} (seřazených podle výslednice), pro poslední měřený průjezd řezného nástroje s povlakem ALWIN.

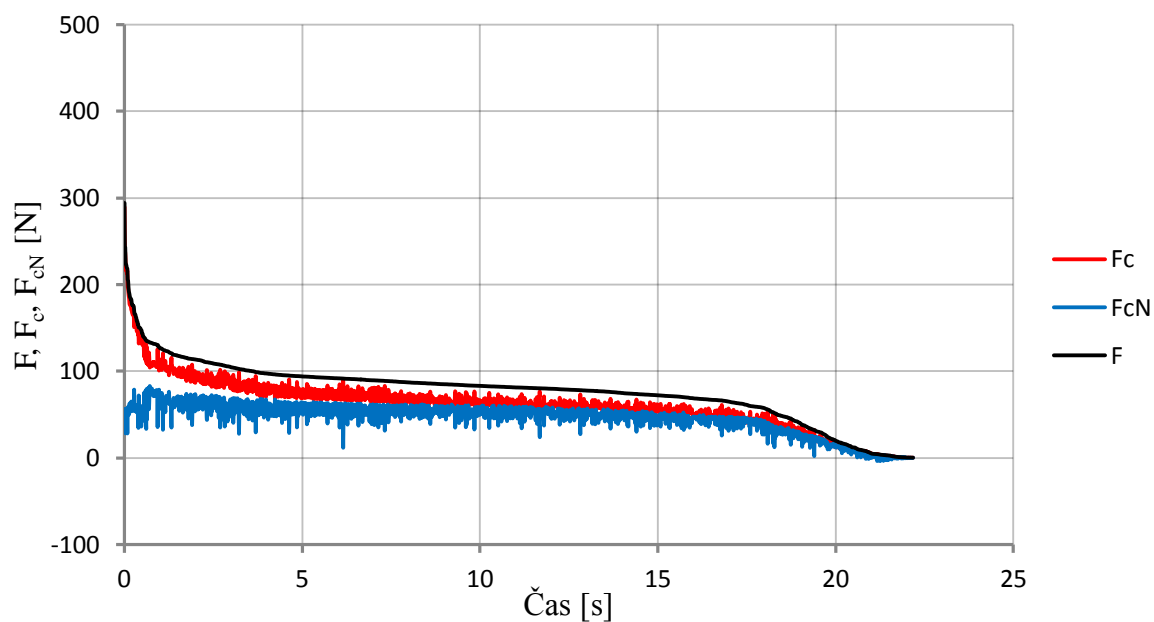
Grafické závislosti pro řezný nástroj s povlakem TripleCoating Cr



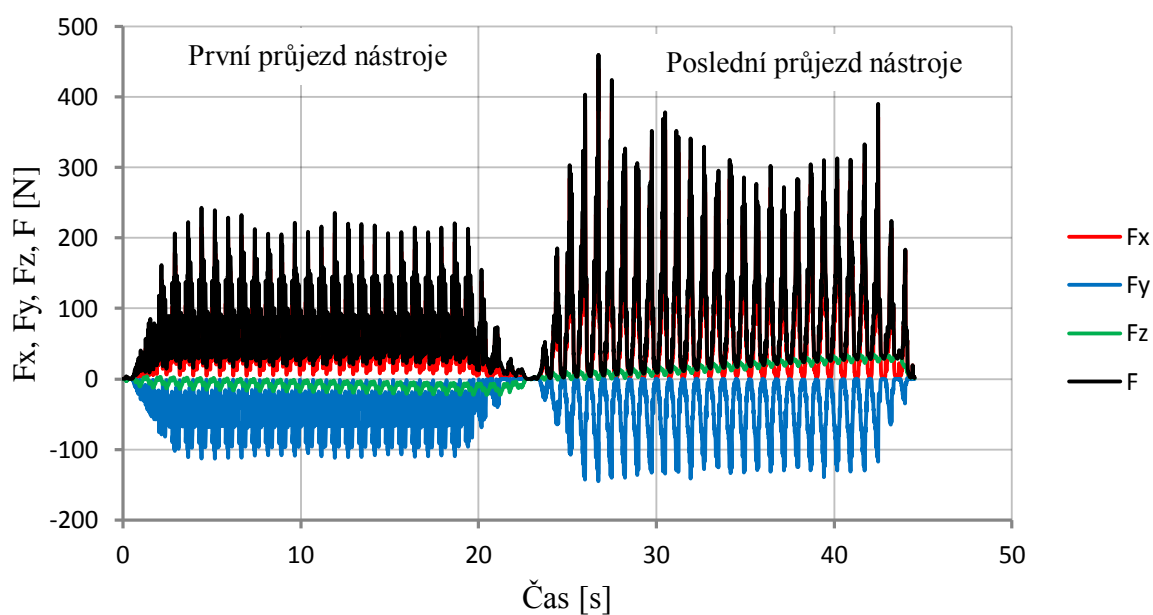
Obr. 4.34 Průběhy sil F_x , F_y , F_z a F pro první a poslední měřený průjezd řezného nástroje s povlakem TripleCoating Cr.



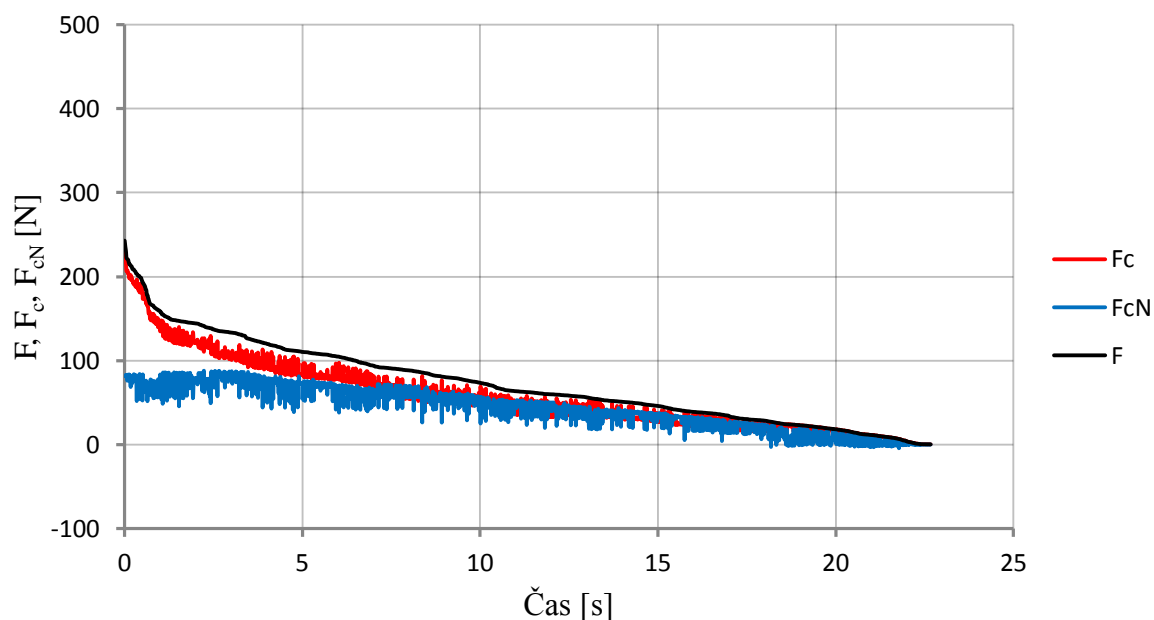
Obr. 4.35 Průběhy sil F , F_c a F_{cN} (seřazených podle výslednice), pro první měřený průjezd řezného nástroje s povlakem TripleCoating Cr.



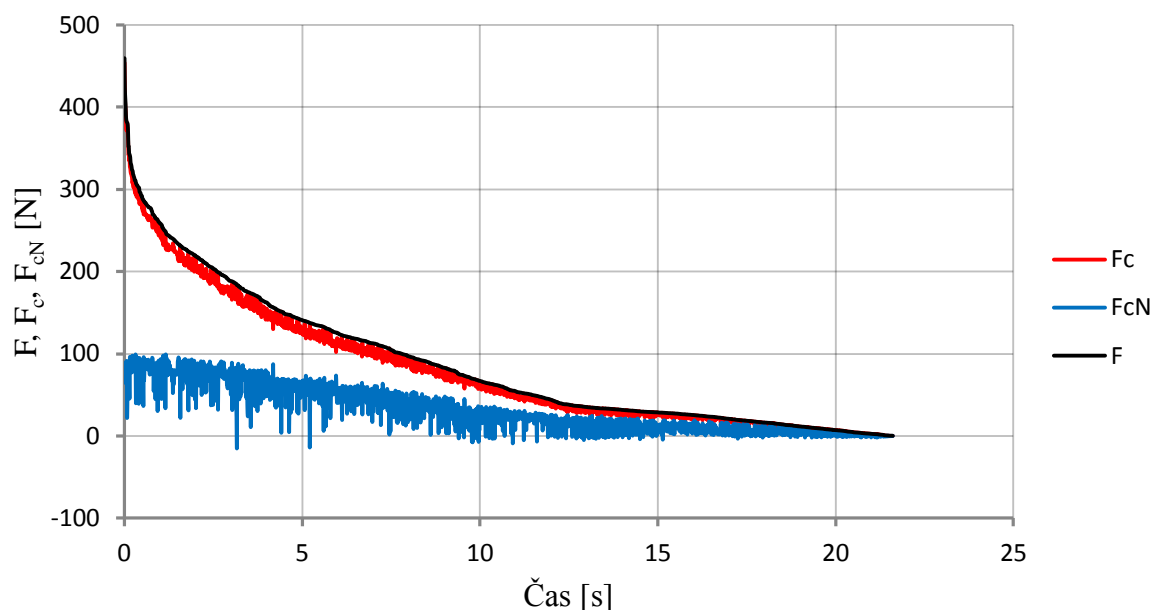
Obr. 4.36 Průběhy sil F , F_c a F_{cN} (seřazených podle výslednice), pro poslední měřený průjezd řezného nástroje s povlakem TripleCoating Cr.

Grafické závislosti pro řezný nástroj s povlakem BIGAAN

Obr. 4.37 Průběhy sil F_x , F_y , F_z a F pro první a poslední měřený průjezd řezného nástroje s povlakem BIGAAN.



Obr. 4.38 Průběhy sil F , F_c a F_{cN} (seřazených podle výslednice), pro první měřený průjezd řezného nástroje s povlakem BIGAAN.



Obr. 4.39 Průběhy sil F , F_c a F_{cN} (seřazených podle výslednice), pro poslední měřený průjezd řezného nástroje s povlakem BIGAAN.

Na grafech lze vidět, že u některých nástrojů obr. 4.25 a obr. 4.37 byly zaznamenány větší rozdíly mezi měřenými hodnotami, což může být částečně způsobeno například vyšší radiální házivostí kotoučů, nebo odlišným zaoblením ostří jednotlivých zubů. Naopak silově nejvyrovnanější obrábění bylo dosaženo s nástrojem bez jakékoliv úpravy (obr. 4.22), případně pilovými kotouči s povlaky TiCN MP (obr. 4.28) a TripleCoating Cr (obr. 4.34).

Na první pohled je patrné, že nejmenší síly vykazoval nepovlakovaný nástroj bez jakékoliv úpravy ostří, v porovnání s nástrojem, u kterého byla provedena rektifikace ostří a odjehlení jsou síly trojnásobně menší. Lze si to vysvětlit tím, že se zvětšujícím se poloměrem zaoblení břitu roste také silové zatížení nástroje (dochází k většímu pěchování materiálu pod bifurkačním bodem na břitu nástroje), ale ostří není tak náchylné na vydrolování. Tomu, že se materiál více pěchuje, napovídá i fakt, že mimo dvojnásobnou řeznou sílu byla u rektifikovaného nástroje v prvním průjezdu naměřena v porovnání s neupraveným nástrojem téměř dvojnásobná síla F_{cN} . Proto i povlakované nástroje, které prošly předpovlakovací úpravou vykazují vyšší síly.

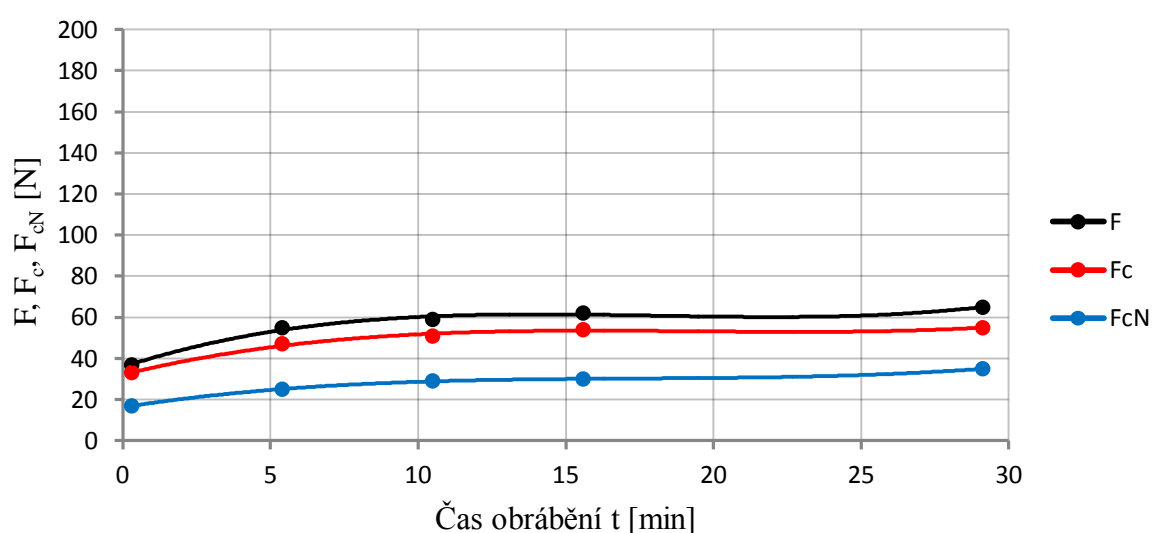
Z toho důvodu je vhodné následující grafy vyhodnocovat jednotlivě, a to z pohledu nárůstu hodnot sil mezi prvním a posledním měřeným průjezdem jednotlivých nástrojů. Řezné nástroje, vykazující vysoké hodnoty sil, nemusí být ihned nejhorší. To ostatně dokazují hodnoty zobrazené v tab. 4.9, kde byla vypočítána střední hodnota z první poloviny hodnot sil F , F_c a F_{cN} , které byly seřazeny sestupně. Do výpočtu tedy nebyly zahrnuty ani hodnoty měřené při výjezdu/nájezdu nástroje do materiálu, kdy nebylo dosaženo řezání s více zuby v záběru. Tento výpočet byl proveden pro první a poslední měřený průjezd nástroje a doplněn rozdílem těchto hodnot.

Tab. 4.9 Průměrné hodnoty sil při prvním a posledním měřeném průjezdu řezného nástroje.

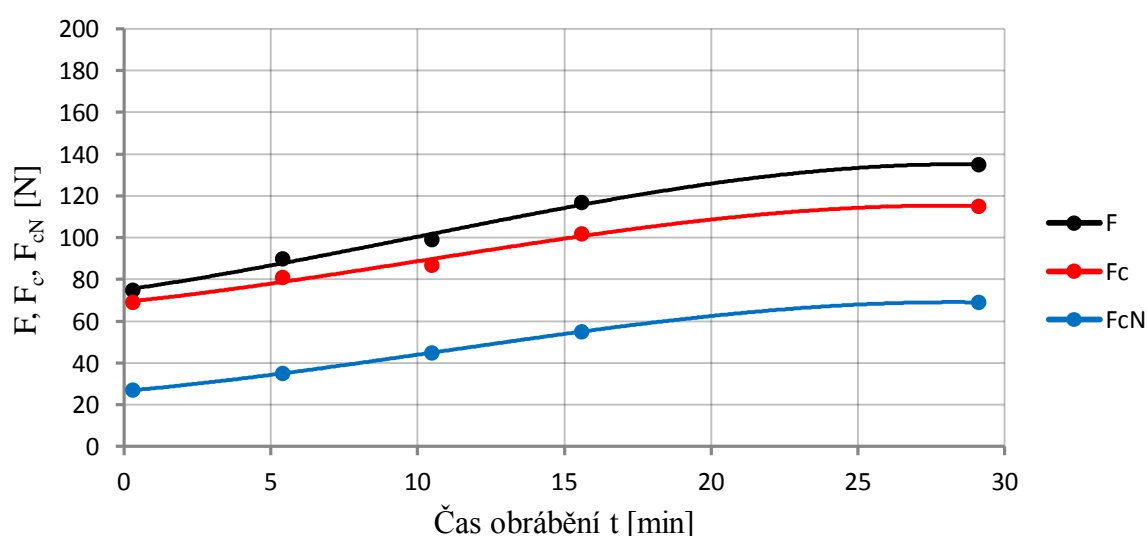
Neodjehlený nepovlakovaný řezný nástroj				
Označení síly	První průjezd [N]	Poslední průjezd [N]	Rozdíl hodnot [N]	
F_{cN}	17	35	18	(↑106 %)
F_c	33	55	22	(↑67 %)
F	37	65	28	(↑76 %)
Odjehlený nepovlakovaný řezný nástroj				
Označení síly	První průjezd [N]	Poslední průjezd [N]	Rozdíl hodnot [N]	
F_{cN}	27	69	42	(↑156 %)
F_c	69	115	46	(↑67 %)
F	75	135	60	(↑80 %)
Řezný nástroj s povlakem TiCN MP				
Označení síly	První průjezd [N]	Poslední průjezd [N]	Rozdíl hodnot [N]	
F_{cN}	30	37	7	(↑23 %)
F_c	83	85	2	(↑2 %)
F	90	94	4	(↑4 %)
Řezný nástroj s povlakem ALWIN				
Označení síly	První průjezd [N]	Poslední průjezd [N]	Rozdíl hodnot [N]	
F_{cN}	30	39	9	(↑30 %)
F_c	88	100	12	(↑14 %)
F	95	108	13	(↑14 %)
Řezný nástroj s povlakem TripleCoating Cr				
Označení síly	První průjezd [N]	Poslední průjezd [N]	Rozdíl hodnot [N]	
F_{cN}	57	58	1	(↑2 %)
F_c	77	81	4	(↑5 %)
F	97	100	3	(↑3 %)
Řezný nástroj s povlakem BIGAAN				
Označení síly	První průjezd [N]	Poslední průjezd [N]	Rozdíl hodnot [N]	
F_{cN}	64	65	1	(↑2 %)
F_c	89	137	48	(↑54 %)
F	112	148	36	(↑32 %)

I když nástroj bez jakékoliv úpravy vykazoval nejmenší silové zatížení, při porovnání v tab. 4.9, došlo k 76% nárůstu celkové síly mezi prvním a posledním průjezdem. Téměř shodné procentuální navýšení sil vykazoval i nepovlakovaný nástroj s rektifikovaným ostřím, ale síly na něj působící jsou cca dvakrát tak větší. Nejlépe podle tohoto kritéria dopadly řezné nástroje s povlaky TiCN MP (nárůst F o 4 %) a TripleCoating Cr (nárůst F o 3 %). Zbylé dva povlakované nástroje dopadly hůře, avšak ani zde nedošlo k tak dramatickému nárůstu sil, jak u nepovlakované dvojice.

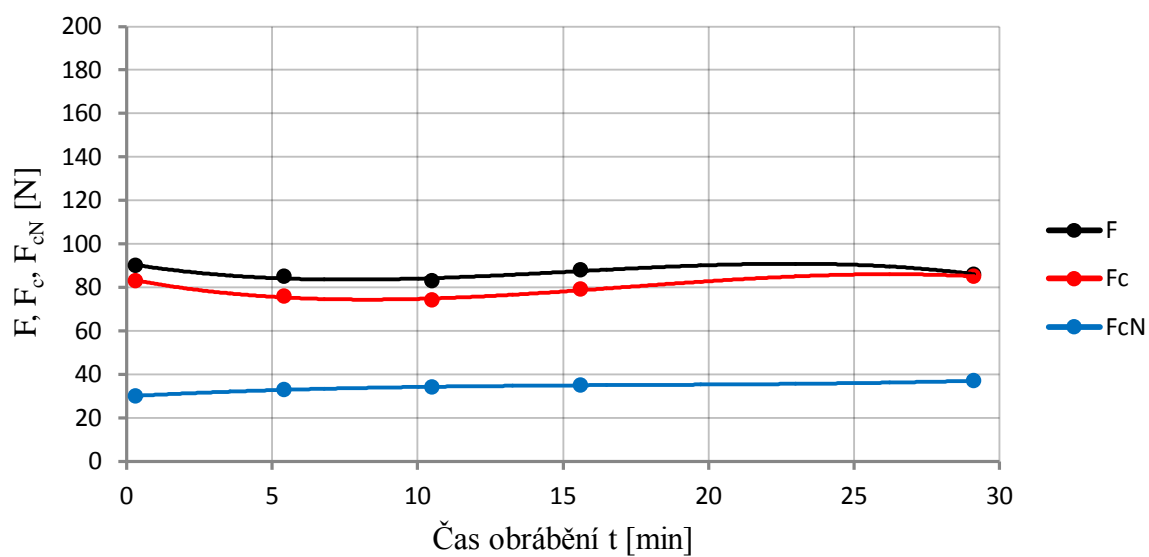
Na grafech 4.34 až 4.39 jsou bodově znázorněny průměrné hodnoty sil, které byly získány měřením po určité obrobené dráze. Tyto body byly proloženy polynomem třetího stupně. Cílem je, aby byl průběh křivky, co nejvíce konstantní, tzn. mezi prvním a posledním měřeným průjezdem nastal minimální nárůst sil.



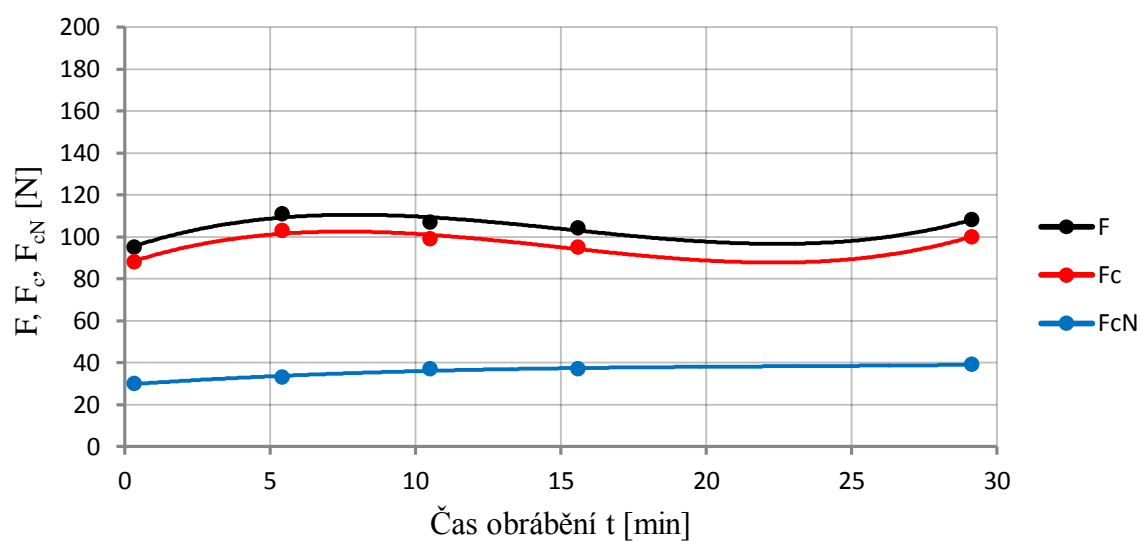
Obr. 4.40 Průběh průměrných hodnot silových složek v závislosti na čase pro nepovlakovaný neodjehlený řezný nástroj.



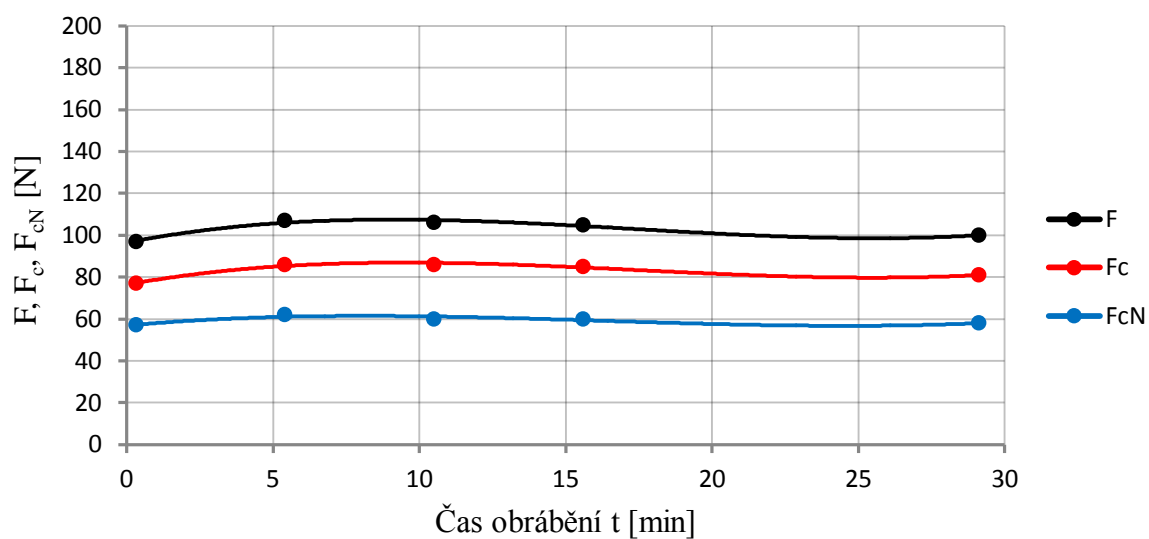
Obr. 4.41 Průběh průměrných hodnot silových složek v závislosti na čase pro nepovlakovaný odjehlený řezný nástroj.



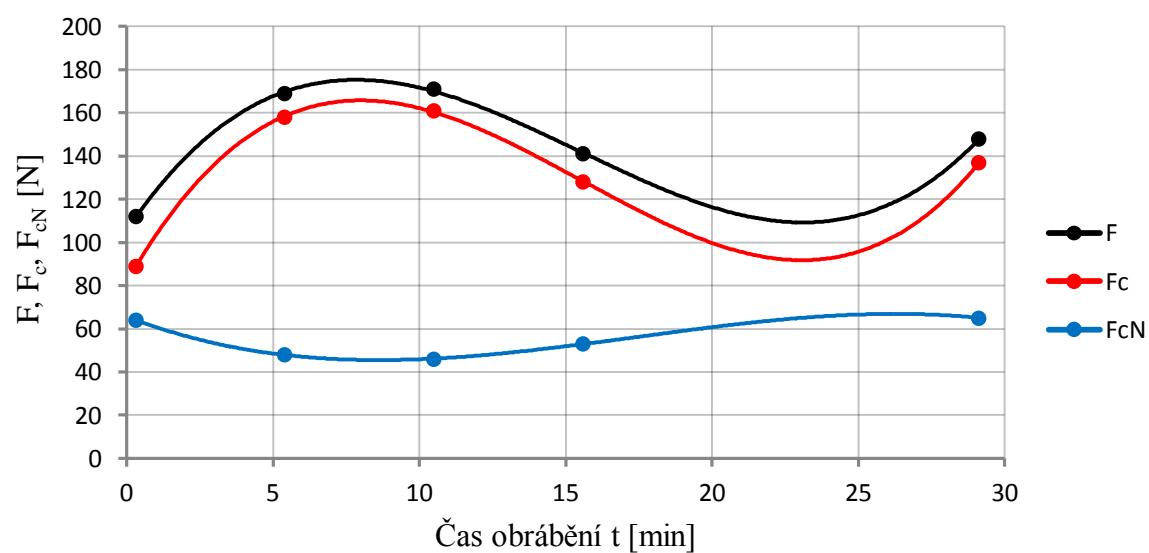
Obr. 4.42 Průběh průměrných hodnot silových složek v závislosti na čase pro řezný nástroj s povlakem TiCN MP.



Obr. 4.43 Průběh průměrných hodnot silových složek v závislosti na čase pro řezný nástroj s povlakem ALWIN.



Obr. 4.44 Průběh průměrných hodnot silových složek v závislosti na čase pro řezný nástroj s povlakem TripleCoating Cr.



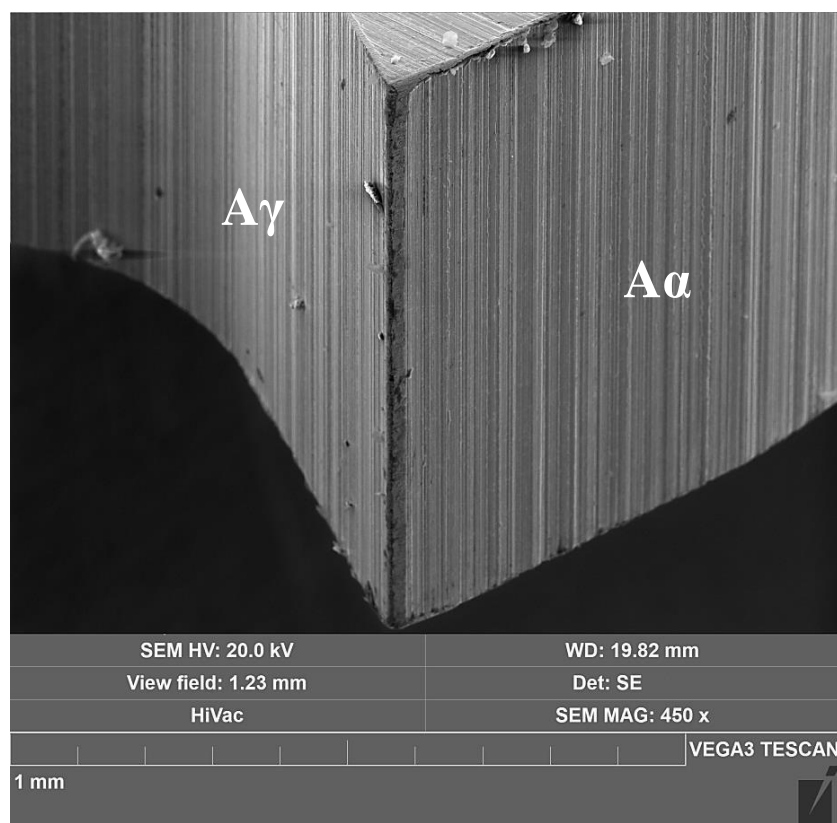
Obr. 4.45 Průběh průměrných hodnot silových složek v závislosti na čase pro řezný nástroj s povlakem BIGAAN.

4.10 Analýza opotřebení pilových kotoučů pomocí elektronové mikroskopie

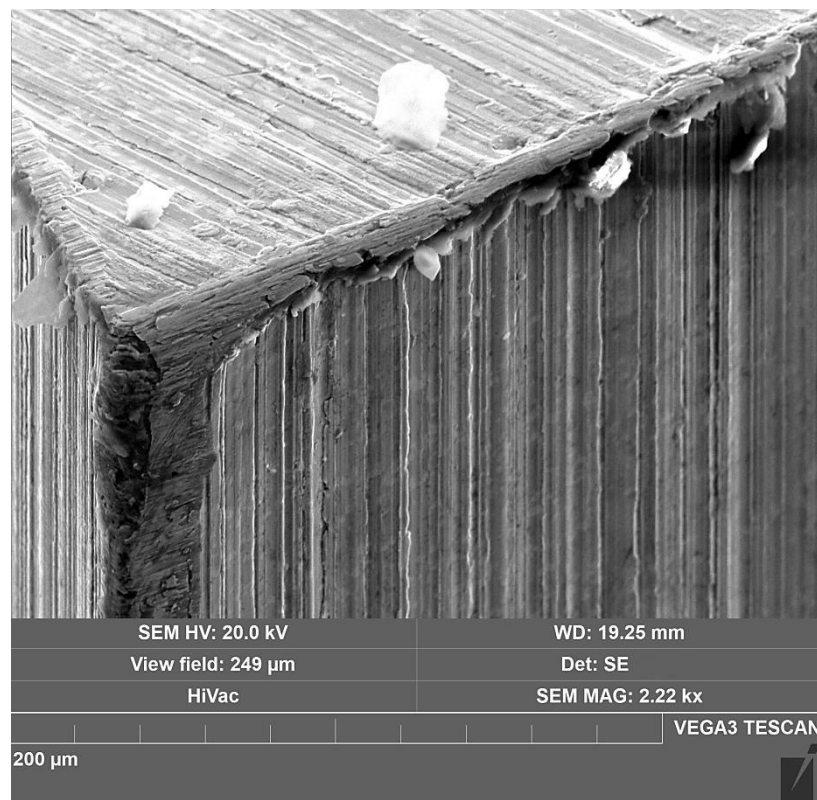
Elektronové mikroskopy lze rozdělit do dvou základních kategorií. První kategorií jsou řádkovací elektronové mikroskopy (SEM – Scanning Electron Microscope), druhou pak elektronové mikroskopy transmisní (TEM – Transmission Electron Microscope). TEM se používají pro pozorování a analýzu vnitřní struktury vzorku a zobrazení jednotlivých atomů. Limitující je v jistém ohledu potřeba tenkého vzorku $10\div 500$ nm, aby jim svazek elektronů prošel [90].

Pro analýzu opotřebení pilových kotoučů byl použit mikroskop skenovací, který se používá pro zobrazení a analýzu povrchů. Primární elektronový svazek skenuje povrch vzorku řádek po řádku synchronně s elektronovým paprskem v pozorovací obrazovce. Z každého bodu jsou vybudeny určité signály. Informaci o povrchové topografii (prostorový obraz s velkou hloubkou ostrosti) přináší sekundární elektrony - SE. Informaci o lokálních změnách materiálu (materiálovém kontrastu) přinášejí zpětně odražené elektrony – BSE, které mají energii srovnatelnou s primárním paprskem a vystupují z větší hloubky [91].

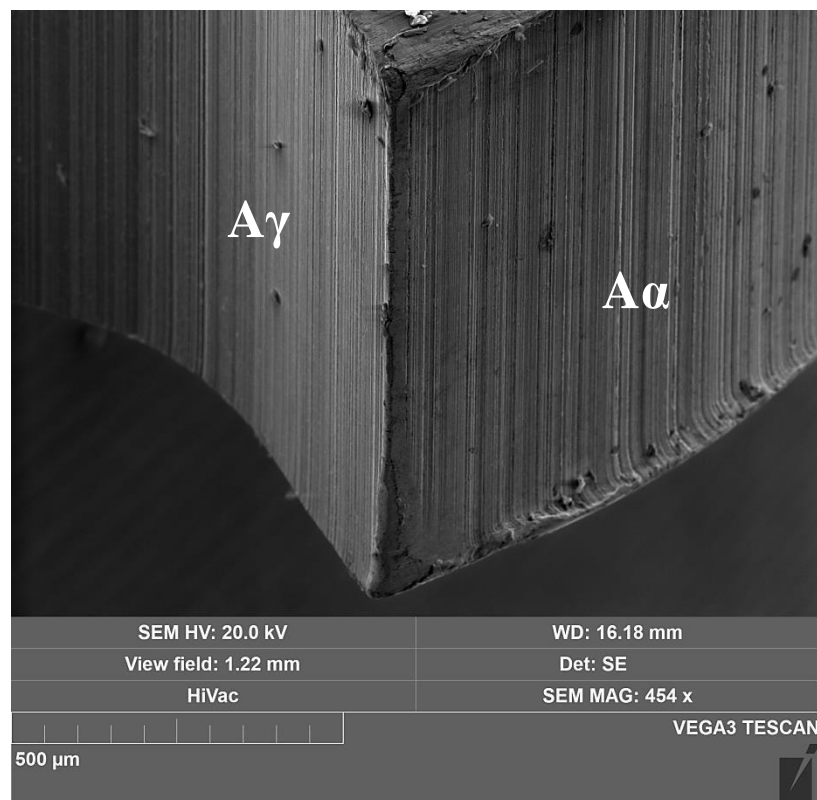
4.10.1 Snímky z elektronového mikroskopu



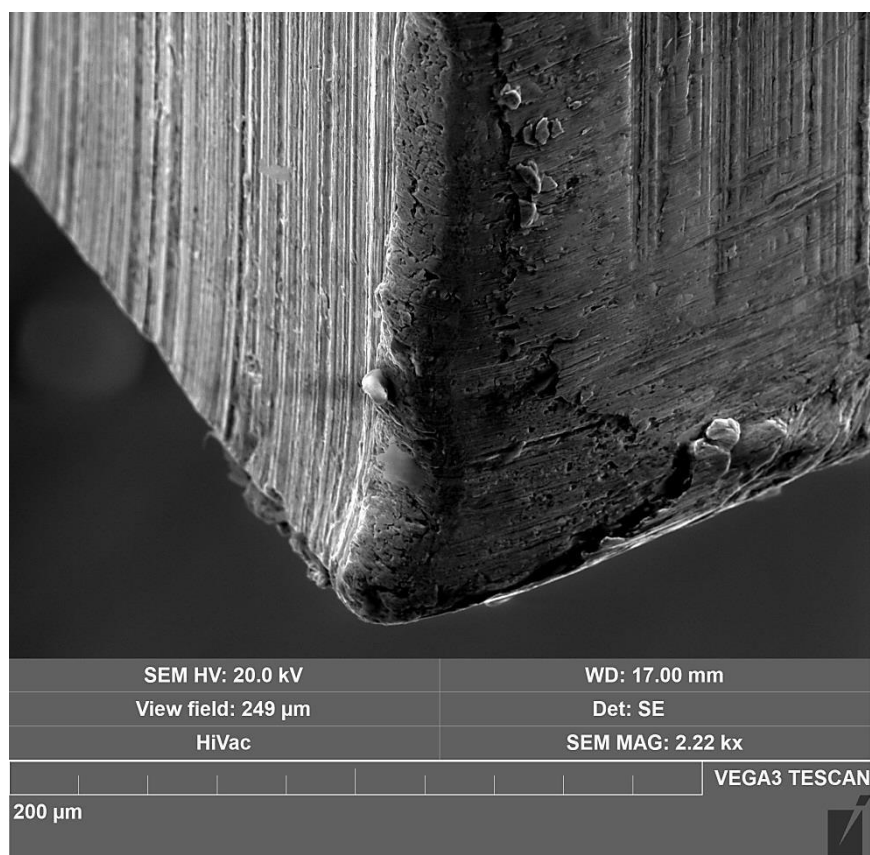
Obr. 4.46 Ostří nepovlakovaného neodjehleného řezného nástroje.



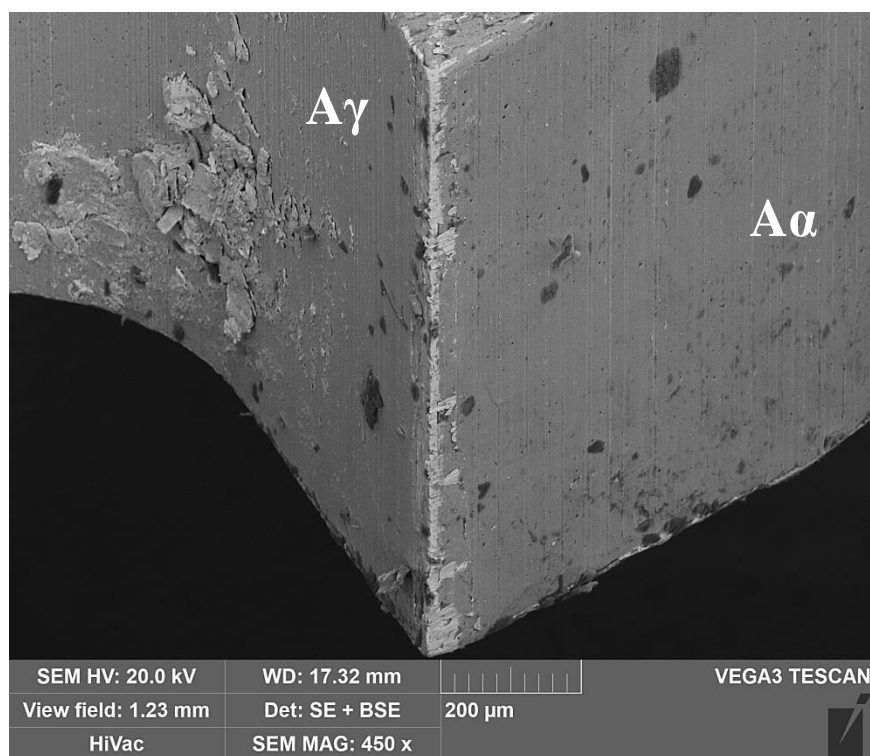
Obr. 4.47 Detail ostří nepovlakovaného neodjehleného řezného nástroje.



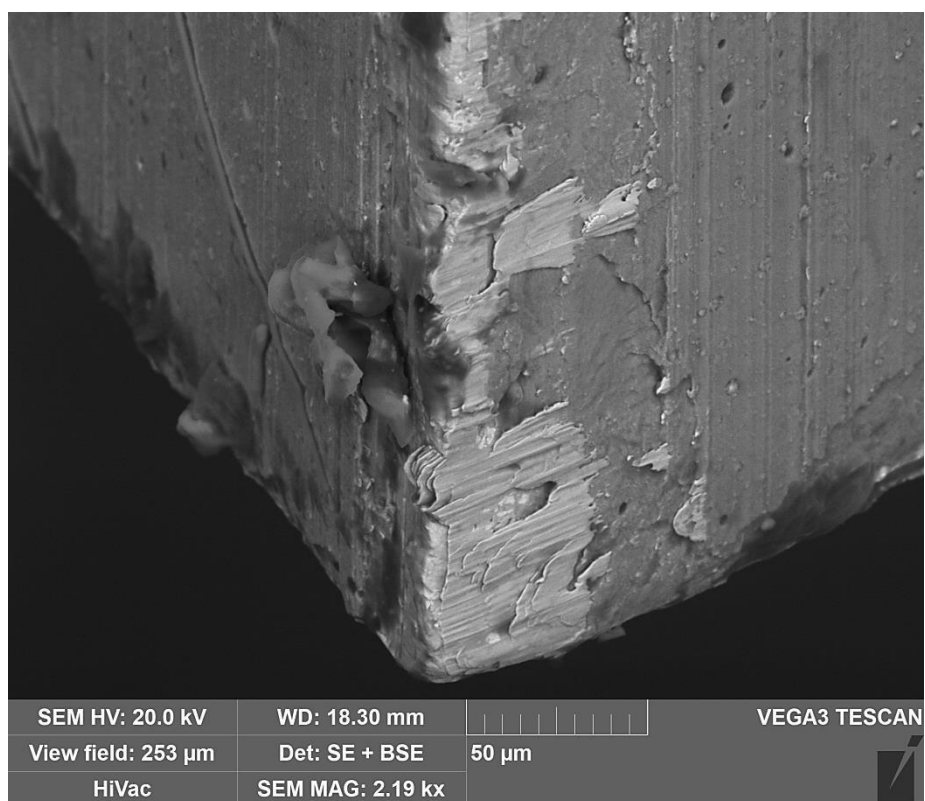
Obr. 4.48 Ostří nepovlakovaného odjehleného řezného nástroje.



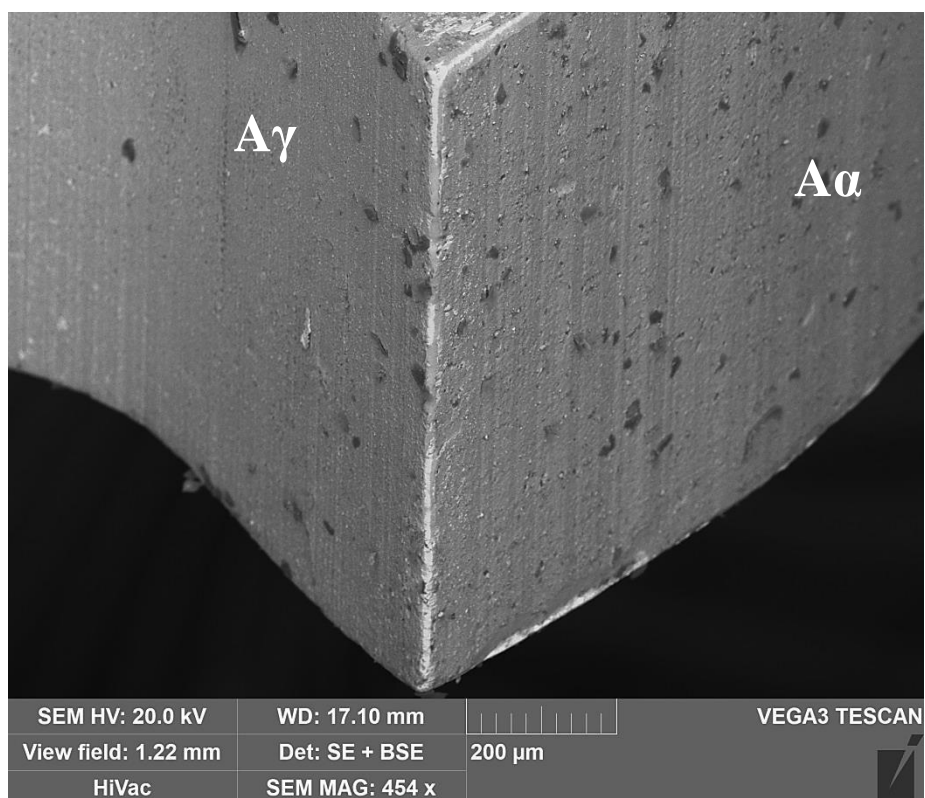
Obr. 4.49 Detail ostří nepovlakovaného odjehleného řezného nástroje.



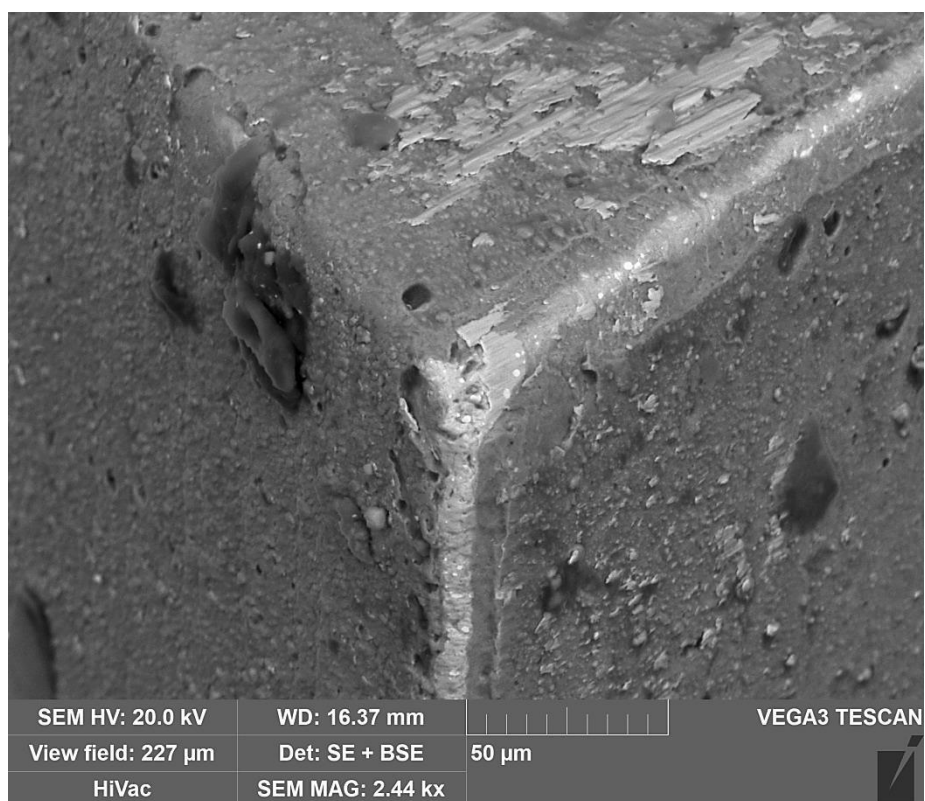
Obr. 4.50 Ostří řezného nástroje s povlakem TiCN MP.



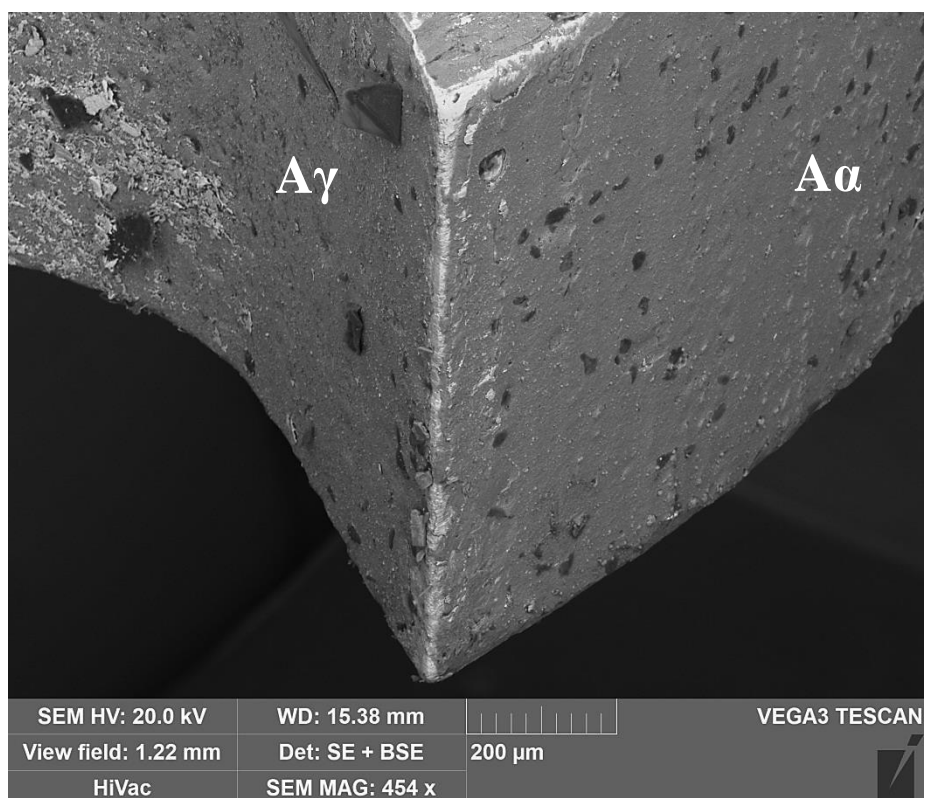
Obr. 4.51 Detail ostří řezného nástroje s povlakem TiCN MP.



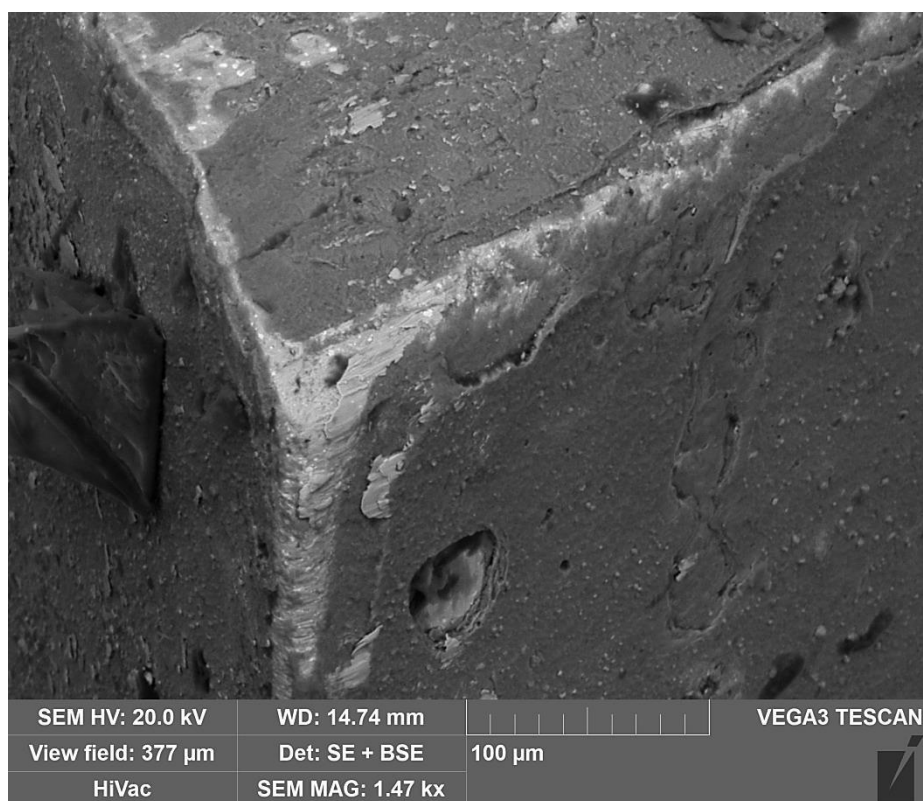
Obr. 4.52 Ostří řezného nástroje s povlakem ALWIN.



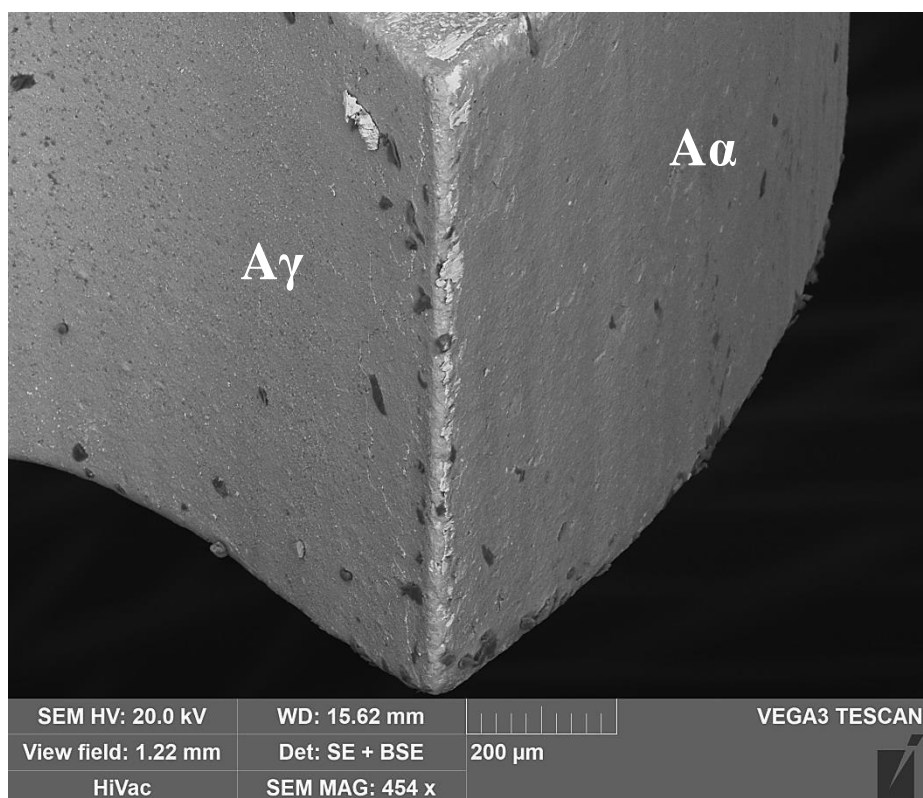
Obr. 4.53 Detail ostří řezného nástroje s povlakem ALWIN.



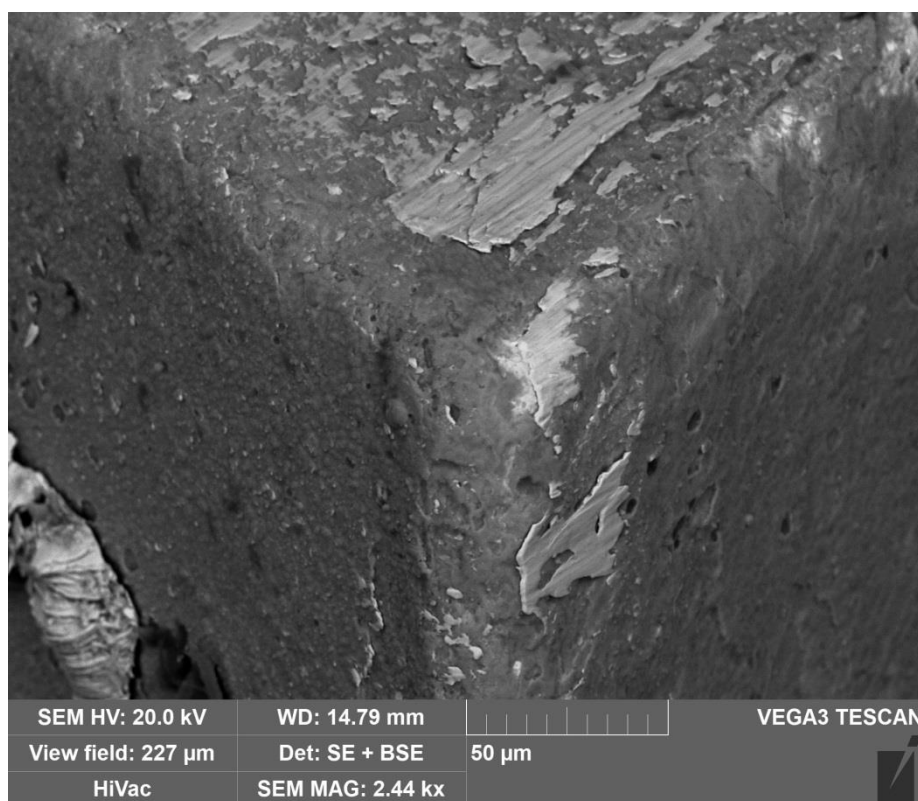
Obr. 4.54 Ostří řezného nástroje s povlakem TripleCoating Cr.



Obr. 4.55 Detail ostří řezného nástroje s povlakem TripleCoating Cr.



Obr. 4.56 Detail ostří řezného nástroje s povlakem BIGAAN.



Obr. 4.57 Detail ostří řezného nástroje s povlakem BIGAAN.

Na snímcích z elektronového mikroskopu se vizuálně potvrdilo největší opotřebení nepovlakovaného neodjehleného řezného nástroje (obr. 4.49). Ve větší míře se objevuje ulpěný materiál jak na hřbetě nebo ostří (obr. 4.51), tak na bocích kotoučů (obr. 4.53 a obr. 4.57), což je vzhledem k vysoké tažnosti obráběného materiálu pochopitelné. Velmi dobrou přilnavost deponované vrstvy k substrátu a vysokou odolnost proti opotřebení vykazuje povlak BIGAAN, kdy na fotografovaném zubu (obr. 4.56 a obr. 4.57) nejsou žádné větší známky porušení povlaku, či ostří. Na všech povlakovaných pilových kotoučích jsou vidět menší projevy opotřebovávání, než u nepovlakovaných nástrojů.

4.11 Použití povlakovaných řezných nástrojů v reálném procesu

Ve firmě SHM, s.r.o. bylo provedeno povlakování vždy dvou kotoučů stejným povlakem. Jeden řezný nástroj z každé dvojice byl použit při experimentu v dílnách Ústavu strojírenské technologie na FSI VUT v Brně. Zbylé nepoužité nástroje byly testovány přímo v reálném procesu řezání ve firmě fischer Vyškov, s.r.o.

Byly zajištěny i shodné řezné podmínky (tab. 4. 10). Dobu trvanlivosti řezného nástroje byla stanovována na základě vzhledu řezné spáry, a to podle velikostí otřepů vznikajících na součástce při výjezdu zubu z řezu. V tomto případě byl použit pro řezání hmoždinek z materiálu AISI 1015 popsáném v kap. 3.1.1.

Tab. 4.10 Zvolené řezné podmínky ve firmě fischer Vyškov, s.r.o.

Řezný parametr	Označení parametru	Hodnota parametru
Řezná rychlost	v_c	100 m.min ⁻¹
Otáčky vřetene	n	318 min ⁻¹
Posuv na zub	f_z	0,01 mm
Posuvová rychlost	v_f	318 mm.min ⁻¹

Výsledky z praxe, jsou zobrazeny v tab. 4.11, kde sledovaným parametrem byl počet kusů vyrobených daným kotoučem za dobu jeho trvanlivosti, po kterou je řezný nástroj schopen kvalitativně vykonávat požadavky na něj kladené. Srovnání je oproti aktuálnímu neodjehlenému nepovlakovanému řeznému nástroji, který je stejného průměru, se stejným počtem zubů a stejným tvarem zubů.

Tab. 4.11 Počet vyrobených kusů hmoždinek v reálném procesu [92].

Řezný nástroj	Počet vyrobených kusů [-]	Navýšení počtu kusů [-]	Navýšení životnosti nástrojů [%]
S povlakem TiCN MP	7 700	2 700	71
S povlakem ALWIN	7 000	2 000	56
S povlakem TripleCoating Cr	11 000	6 000	144
S povlakem BIGAAN	6 500	1 500	44
Aktuální nástroj	4500		

ZÁVĚR

V experimentální části proběhlo testování řezných nástrojů při obrábění oceli ČSN 41 7346. Bylo použito šest nástrojů. Dva nepovlakované nástroje, přičemž jeden z nich byl zbaven otřepů a bylo provedeno zaoblení jeho ostří. Zbylé čtyři pilové kotouče byly povlakovány odlišnými povlaky (Ti(C,N); Cr-Al-Si-N; Al-Cr-B-N; TiN + (Al, Ti)N + Cr-Al-Si-N). Každým nástrojem se obrobila dráha o délce 4 660 mm.

Z experimentální části diplomové práce lze vyvodit tyto závěry:

- po povlakovacím procesu byla změřená axiální házivost řezných nástrojů v intervalu jejich výrobní tolerance, proto lze předpokládat, že povlakovací proces nemá na čelní házení výraznější vliv,
- provedené odjehlení a rektifikace ostří se projevovalo výrazným zvýšením silového zatížení nástroje, přičemž celkový procentuální nárůst sil mezi prvním a posledním měřeným průjezdem byl srovnatelný s neupraveným nástrojem,
- hřbetní opotřebení povlakovaných a nepovlakovaných kotoučů nenabývalo po obrobení dráhy o délce 4 660 mm větších rozměrů, maximální naměřená hodnota odpovídala 0,1 mm pro nepovlakovaný odjehlený řezný nástroj,
- nejnižší hřbetní opotřebení VB (0,05 mm) bylo naměřeno na řezném nástroji s povlakem BIGAAN,
- na bocích některých nástrojů (obr. 4.14 a obr. 4.16) lze pozorovat plastická deformace, vzniklá vlivem tření kotouče v řezné spáře,
- ze snímků (obr. 4.17 a 4.18) je patrný přínos povlaků zejména k potlačení tření boků řezného nástroje v drážce, kdy oproti nepovlakovanému kotouči (obr. 4.14) nejsou viditelné známky plastické deformace na bocích zubů, proto lze očekávat příznivý vliv povlaků i po přebroušení nástroje,
- některé řezné nástroje vykazovaly rozdíly mezi hodnotami silového zatížení, což mohlo částečně způsobit radiální házení kotouče, a tím rozdílná hodnota A_{Dmax} , nebo odlišné zaoblení ostří jednotlivých zubů,
- nejmenší nárůst sil mezi prvním a posledním měřeným průjezdem pilového kotouče byl zaznamenán u nástroje s povlakem TripleCoating Cr (nárůst F o 3 %) a nástroje s povlakem, TiCN MP (nárůst F o 4 %)
- nejvyšší síly při řezání byly naměřeny u řezného nástroje s povlakem BIGAAN, a to jak pro první, tak poslední měřený průjezd,
- na snímcích z elektronového mikroskopu se potvrdilo větší hřbetní opotřebení nepovlakovaných řezných nástrojů ve srovnání s nástroji povlakovanými,
- na obr. 4.56 a obr. 4.57 je zachycen řezný nástroj s povlakem BIGAAN, jehož povlak na ostří a hřbetu konkrétního zubu nebyl ani na konci experimentu porušen, deponovaná vrstva tedy vykazuje silnou přilnavost k základnímu materiálu a odolnost proti abrazivnímu opotřebení,

- trvanlivosti jednotlivých řezných nástrojů použitých při reálném řezání hmoždinek plně korespondovala se silovými zatíženími, které byly změřeny při experimentu, tzn., větší nárůst sil v průběhu experimentu napovídal nižší trvanlivosti nástroje,
- povlakované pilové kotouče, použité při řezání hmoždinek výrazně převyšovaly trvanlivost aktuálně používaného nástroje, a to minimálně o 44 %,
- řeznými nástroji s povlaky TripleCoating Cr a TiCN MP, které při měření silového zatížení dosahovaly nejmenšího procentuálního nárůstu sil mezi prvním, a posledním měřeným průjezdem nástroje se obrobilo v reálném procesu největší množství hmoždinek,
- pilovým kotoučem s povlakem TripleCoating Cr se překonala trvanlivost aktuálně používaného nástroje o 144 %,
- doporučuje se v další fázi testování zkontrolovat míru zaoblení ostří pomocí mikroskopu společnosti Alicona Imaging GmbH, jestli nedošlo k přílišné rektifikaci ostří, nebo jeho částečnému natavení při povlakovacím procesu,
- zvážit možnost zakoupení nového stroje do strojového parku firmy fischer Vyškov, s.r.o., nebo modernizaci strojů stávajících, zejména nahrazení elektromotorů s nízkým výkonem.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KAŠPAR, L. *Analýza konvenční technologie dělení materiálu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 42 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Oskar Zemčík, CSc.
- [2] ZEMČÍK, Oskar. *Nástroje a přípravky pro obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003, 193 s.: obr. 1 CD-ROM. ISBN 80-214-2336-6.
- [3] CHLADIL, Josef. *Přípravky a nástroje: Část - Obrábění*. 3. vyd. Brno: VUT, 1992, 157 s. ISBN 80-214-0408-6.
- [4] HUMÁR, Anton. *Technologie I: Základní metody obrábění - II. část* [online]. Interaktivní multimediální text pro magisterskou formu studia. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2004 [cit. 2016-01-15]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/TI_TO-2cast.pdf
- [5] VIGNER, Miloslav, PŘIKRYL, Zdeněk a kolektiv. *Obrábění*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1984. 800 s.
- [6] Obecně o kotoučích. *Pilove-kotouce.eu* [online]. [cit. 2018-01-27]. Dostupné z: <http://www.pilove-kotouce.eu/Obecne-o-kotoucich/>
- [7] Avanti. *The Home Depot* [online]. [cit. 2018-01-23]. Dostupné z: <https://www.homedepot.com/p/Avanti-7-in-x-128-Teeth-Ferrous-Metal-Cutting-Saw-Blade-A07128R/202021701>
- [8] Nástrojová poradna. *GSP -Hight Tech Saws* [online]. Zborovice [cit. 2018-01-27]. Dostupné z: <http://www.gspzborovice.cz/Nastrojova-poradna/>
- [9] Kotoučové pily na kov. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2002, (4) [cit. 2018-01-23]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/kotoucove-pily-na-kov.html>
- [10] Circular saw manufacturing process. *Harris Sawing Equipment* [online]. [cit. 2018-01-27]. Dostupné z: <http://www.harrissawing.com/circular-saw-manufacturing-process/>
- [11] Pilové kotouče HSS dělicí. *GSP -Hight Tech Saws* [online]. Zborovice [cit. 2018-01-27]. Dostupné z: <http://www.gspzborovice.cz/HSS-delici-pilove-kotouce/#topnadp>
- [12] GSP Zborovice. *Český katalog GSP 2013* [online]. [cit. 2018-03-16]. Dostupné z: <http://www.gspzborovice.cz/Ke-stazeni/>
- [13] LISS. *Katalog povlaků* [online]. [cit. 2018-03-16]. Dostupné z: http://www.liss.cz/files/KatalogPovlaku2015CZ_WEB.pdf

- [14] Strojní pilový list KMITOS. *Pilana Metal* [online]. Hulín, 2018 [cit. 2018-01-15]. Dostupné z: <https://www.pilanametal.cz/strojni-pilovy-list-kmitos.html>
- [15] LASÁK, Alois. *Základy strojního obrábění, praktické cvičení, postupy práce* [online]. 2013 [cit. 2018-01-15]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/docview/26/8259578/#file=/storage/26/8259578/8259578.pdf>
- [16] Technické informace k pilovým listům. *Pilana Metal* [online]. Hulín, 2018 [cit. 2018-01-15]. Dostupné z: <http://www.pilana.cz/cz/technicke-informace-k-pilovym-listum>
- [17] Základní informace. *Pilana Metal* [online]. Hulín [cit. 2018-01-27]. Dostupné z: <https://www.pilanametal.cz/zakladni-informace.html>
- [18] Geometrické charakteristiky. *Pilana Metal* [online]. Hulín [cit. 2018-01-27]. Dostupné z: <https://www.pilanametal.cz/geometricke-charakteristiky.html>
- [19] Zubová rozteč. *Pilana Metal* [online]. Hulín [cit. 2018-01-27]. Dostupné z: <https://www.pilanametal.cz/zubova-roztec.html>
- [20] Tvary zubů. *WIKUS* [online]. [cit. 2018-02-05]. Dostupné z: <https://www.wikus.cz/czech/technicke-informace/pilove-pasy/tvary-zubu.html>
- [21] Milwaukee - 14" Abrasive Chop Saw - 6177-20. *Black Rock Tools* [online]. [cit. 2018-01-16]. Dostupné z: <https://www.blackrocktools.com/milwaukee-14-abrasive-chop-saw-6177-20.html>
- [22] *Práce na soustruhu soustružení drážek, zápichy, upichování, vypichování* [online]. [cit. 2018-01-15]. Dostupné z: <https://coptkm.cz/portal/reposit.php?action=0&id=30790&revision=-1&instance=2>
- [23] Frikční pilové kotouče na kov. *GSP -Hight Tech Saws* [online]. Zborovice [cit. 2018-01-16]. Dostupné z: <http://www.gspzborovice.cz/Segmentove-a-frikcni-kotouce/Frikcni-pilove-kotouce/>
- [24] BARCAL, Jaroslav. *Nekonvenční metody obrábění*. Praha: Ediní středisko ČVUT, 1989, 122 s.
- [25] Technologie řezání vodním paprskem - princip řezání. *WCM* [online]. [cit. 2018-01-20]. Dostupné z: <http://wcm.cz/technologie-rezani-vodnim-paprskem/princip-rezani>
- [26] KOČMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-722-2.
- [27] MINAŘÍK, Václav. *Tepelné dělení materiálu*. Praha: České vysoké učení technické, 1993. ISBN 8001010287.

- [28] CUNNINGHAM, Bridget. A Multilevel Approach to Modeling Planar Discharge in CO₂ Lasers. *COMSOL BLOG* [online]. 2017 [cit. 2018-01-28]. Dostupné z: <https://www.comsol.com/blogs/a-multilevel-approach-to-modeling-planar-discharge-in-co2-lasers/>
- [29] ŠMÍD, Jiří. Slab, Innoslab, kotoučový, nebo vláknový laser?. *MM: Průmyslové spektrum* [online]. 2007 [cit. 2018-03-11]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/slab-innoslab-kotoucovy-nebo-vlaknovy-laser.html>
- [30] Princip vláknového - FIBER LASERU. *Leonardo technology*[online]. [cit. 2018-03-11]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-vlaknoveho-fiber-laseru>
- [31] LUKÁŠEK, Jaromír. [Http://www.welding.cz/laser/deleni.htm](http://www.welding.cz/laser/deleni.htm). *Welding.cz* [online]. [cit. 2018-03-11]. Dostupné z: <http://www.welding.cz/laser/deleni.htm>
- [32] *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 80-85771-81-0.
- [33] ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. Nekonvenční metody obrábění - 6. díl. *MM: Průmyslové spektrum* [online]. 2008 [cit. 2018-01-18]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-2.html>
- [34] HUMÁR, Anton: *Technologie I, Technologie obrábění – III. Část* [online]. Interaktivní multimediální text pro bakalářský a magisterský studijní program, VUT Brno, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2005 [cit. 2016-01-15]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/Dokoncovaci_a_nekonvencni_metody_obrabeni/TI_TO-3.cast.pdf
- [35] ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. Nekonvenční metody obrábění. *MM: Průmyslové spektrum* [online]. 2007, (7) [cit. 2018-01-17]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni.html>
- [36] Technologie: Elektroerozivní drátové řezání. *Tvarsteel* [online]. [cit. 2018-01-17]. Dostupné z: <http://www.tvarsteel.cz/technologie/>
- [37] HUMÁR, Anton. *Technologie I: Technologie obrábění - 1. část* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003 [cit. 2018-01-19]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
- [38] SPÁČIL, R. *Trvanlivost VBD při čelním frézování*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 64 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Aleš Jaroš, Ph.D.

- [39] FIALA, Z. *Analýza měrných řezných sil pro nové obráběné materiály a CNC technologie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 125 s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
- [40] DE VOS, Patrick a Jan-Eric STÅHL. *Obrábění kovů: teorie v praxi*. Lund: Fagersta: Division of Production and Materials Engineering, Lund University; Seco Tools AB, 2014, 184 s.
- [41] PÍŠKA, Miroslav. Testování řezivosti čelních a drážkovacích HSS fréz z produkce ZPS-FN, a.s., Zlín. *Sborník odborné konference Frézování III*. FSI VUT v Brně, Brno, 2003, ISBN 80-214-2436-2
- [42] FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
- [43] VELCHEV, Stephan, Ivan KOLEV a Krasimir IVANOV. *Empirical mathematical models of the dependence of the specific cutting force on thickness of cut in turning*. Annals of faculty engineering hunedoara: International Journal of Engineering. Romania: University Politehnica Timisoar, 2011, roč. 9, č. 5, s. 303-312. ISSN 584 – 2673.
- [44] *Rotační nástroje 2017*. Katalog společnosti Sandvik Coromant [online]. [cit. 2018-11-02]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/downloads/pages/default.aspx>
- [45] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 3., dopl. vyd. Úvaly: Albra, 2006. ISBN 80-7361-033-7.
- [46] AISI 1015 Carbon Steel (UNS G10150). *AZO MATERIALS*[online]. 2012 [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6579>
- [47] PETRENEC, Martin. *Chemické složení oceli*. [elektronická pošta]. [cit. 2018-04-07].
- [48] O’SULLIVAN, D a M COTTERELL. Machinability of austenitic stainless steel SS303. *Journal of Materials Processing Tech* [online]. Elsevier B.V, 2002, **124**(1), 153-159 [cit. 2018-03-11]. DOI: 10.1016/S0924-0136(02)00197-8. ISSN 0924-0136.
- [49] Druhy nerezové oceli a příklady jejího užití. *FASTENERS CZ* [online]. 2015 [cit. 2018-03-25]. Dostupné z: <http://www.fasteners-cz.cz/druhy-nerezove-oceli-priklady-jejeho-uziti>

- [50] STRNAD, Tomáš. *Obrobitelnost austenitické ocele – podklad k předmětu KTO/EMO* [online]. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní, 2011 [cit. 2018-03-11]. Dostupné z: <https://cw.zcu.cz/CoursewarePortlets2/DownloadDokumentu?id=43007>
- [51] DE VOS, Patrick. Obrobitelnost nerezových ocelí. *KONSTRUKCE* [online]. 2013 [cit. 2018-03-11]. ISSN 1803-8433. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/obrobitelnost-nerezovych-oceli/>
- [52] Zarážecí kotva EA II. *Fischer international* [online]. [cit. 2018-03-25]. Dostupné z: <http://www.fischer-cz.cz/Domovska-stranka/Produkty/tabid-1766.aspx/cpage-details/pcategory-1000998944/usetemplate-productdetails/>
- [53] DANĚK, Lukáš. *Geometrie pilového kotouče*. [elektronická pošta]. [cit. 2018-03-30].
- [54] Arntz. *Fact book* [online]. [cit. 2018-03-16]. Dostupné z: http://www.sc-servis.cz/cz/ke-stazeni/download%2FARNTZ%2FHSS_Kreissaegeblaetter_EN.pdf
- [55] STARK. *Metal Cutting saw blades 2017* [online]. [cit. 2018-03-16]. Dostupné z: http://www.starktools.com/sites/503250bb96803b6018000004/theme/pdfs/pdfs/Metal_Cutting.pdf
- [56] Karnasch tools. *Circular saw blades* [online]. [cit. 2018-03-16]. Dostupné z: <http://www.karnasch.tools/application/files/3115/1696/5893/gk30-05-01.pdf>
- [57] Dress tools. *Metal cutting circular saw blades of hss* [online]. [cit. 2018-03-16]. Dostupné z: http://www.dress-tools.de/sites/dress-tools.de/files/content/datei-anhang/DRESS_HSS.pdf
- [58] XAVIOR, M.A. a M. ADITHAN. Determining the influence of cutting fluids on tool wear and surface roughness during turning of AISI 304 austenitic stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2009, **209**(2), 900-909 [cit. 2018-02-28]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2008.02.068. ISSN 09240136.
- [59] ABDALLA, H. S., W. BAINES, G. MCINTYRE a C. SLADE. Development of novel sustainable neat-oil metal working fluids for stainless steel and titanium alloy machining. Part 1. Formulation development. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2007, **34**(1-2), 21-33 [cit. 2018-03-17]. DOI: 10.1007/s00170-006-0585-4. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-006-0585-4>

FSI VUT	DIPLOMOVÁ PRÁCE	List	100
---------	-----------------	------	-----

- [60] KURAM, Emel, Babur OZCELIK, Bilgin TOLGA SIMSEK a Erhan DEMIRBAS. The effect of extreme pressure added vegetable based cutting fluids on cutting performance in milling. *Industrial Lubrication and Tribology* [online]. 2013, **65**(3), 181-193 [cit. 2018-03-18]. DOI: 10.1108/00368791311311187. ISSN 0036-8792. Dostupné z: <https://www.emeraldinsight.com/doi/10.1108/00368791311311187>
- [61] LAWAL, S.A., I.A. CHOUDHURY a Y. NUKMAN. Application of vegetable oil-based metalworking fluids in machining ferrous metals—A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. Elsevier, 2011 [cit. 2018-02-28]. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2011.09.003. ISSN 0890-6955.
- [62] SHASHIDHARA, Y.M. a S.R. JAYARAM. Vegetable oils as a potential cutting fluid—An evolution. *Tribology International* [online]. Elsevier, 2010, **43**(5), 1073-1081 [cit. 2018-02-28]. DOI: 10.1016/j.triboint.2009.12.065. ISSN 0301-679X.
- [63] OZCELIK, Babur, Emel KURAM, M. HUSEYIN CETIN a Erhan DEMIRBAS. Experimental investigations of vegetable based cutting fluids with extreme pressure during turning of AISI 304L. *Tribology International* [online]. 2011, **44**(12), 1864-1871 [cit. 2018-03-18]. DOI: 10.1016/j.triboint.2011.07.012. ISSN 0301679X. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X11002192>
- [64] BELLUCO, W a L DE CHIFFRE. Performance evaluation of vegetable-based oils in drilling austenitic stainless steel. *Journal of Materials Processing Tech* [online]. Elsevier B.V., 2004, **148**(2), 171-176 [cit. 2018-02-28]. DOI: 10.1016/S0924-0136(03)00679-4. ISSN 0924-0136.
- [65] HOLUBÁŘ, Pavel, Mojmír JÍLEK a Milan RŮŽIČKA. Moderní PVD povlaky pro řezné aplikace a tváření. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2004, (9) [cit. 2018-03-19]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/moderni-pvd-povlaky-pro-rezne-aplikace-a-tvareni.html>
- [66] CSELLE, T., P. HOLUBÁŘ, O. CODDET, C. GALAMAND, M. JILEK, J. JILEK, A. LUEMKEMANN a M. MORSTEIN. TripleCoatings3® – New Generation of PVD-Coatings for Cutting Tools. *Journal of Machine Manufacturing* [online]. 2009, **49** [cit. 2018-02-28]. Dostupné z: https://www.platit.com/sites/default/files/pdf/machine_manufacturing_-triple_coating_-_jan_2009-mobile.pdf
- [67] SHM. *SHM v roce 2017*. Zápisník.
- [68] HOLUBÁŘ, Pavel, Mojmír JÍLEK a Michal ŠÍMA. Nanokompozitní otěruvzdorné PVD vrstvy. *METAL 2001* [online]. 2001 [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: <http://konference.tanger.cz/data/metal2001/sbornik/papers/10.pdf>

- [69] *Tenké vrstvy nitridů kovů – výroba, aplikace, vlastnosti* [online]. Západočeská univerzita v Plzni [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/download/PU_prednaska.pdf
- [70] HUDEČEK, P. Testování řezivosti nástrojů ze slinutých karbidů povlakovaných PVD nanokrystalickými kompozity. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 71 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Miroslav Píška, CSc.
- [71] BORO VAN, Petr. SHM znamená svět tvrdých materiálů. *Technický týdeník* [online]. [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/shm-znamená-svět-tvrdých-materialu_18556.html
- [72] FERNÁNDEZ-ABIA, A.I., J. BARREIRO, J. FERNÁNDEZ-LARRINOA, L.N. López de LACALLE, A. FERNÁNDEZ-VALDIVIELSO a O.M. PEREIRA. Behaviour of PVD Coatings in the Turning of Austenitic Stainless Steels. *Procedia Engineering* [online]. Elsevier, 2013, **63**, 133-141 [cit. 2018-04-01]. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.08.241. ISSN 1877-7058.
- [73] PARK, In-Wook, Dong Shik KANG, John J. MOORE, Sik Chol KWON, Jong Joo RHA a Kwang Ho KIM. Microstructures, mechanical properties, and tribological behaviors of Cr–Al–N, Cr–Si–N, and Cr–Al–Si–N coatings by a hybrid coating system. *Surface & Coatings Technology* [online]. Elsevier B.V, 2007, **201**(9), 5223-5227 [cit. 2018-04-01]. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2006.07.118. ISSN 0257-8972.
- [74] WU, Weiwei, Wanglin CHEN, Shubao YANG, Yue LIN, Shihong ZHANG, Tong-Yul CHO, G.H. LEE a Sik-Chol KWON. Design of AlCrSiN multilayers and nanocomposite coating for HSS cutting tools. *Applied Surface Science* [online]. Elsevier B.V, 2015, **351**, 803-810 [cit. 2018-04-01]. DOI: 10.1016/j.apsusc.2015.05.191. ISSN 0169-4332.
- [75] HOLUBÁŘ, Pavel. *SHM-povlaky*. [elektronická pošta]. [cit. 2018-03-30].
- [76] STAVÁREK, Martin. *LISS-povlaky*. [elektronická pošta]. [cit. 2018-03-30].
- [77] HOLUBÁŘ, Pavel, Michal ŠÍMA a Vladimír MAIXNER. Aplikace nových modifikací třívrstevných PVD povlaků. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2011, (4) [cit. 2018-03-18]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/aplikace-novych-modifikaci-trivrstvych-pvd-povlaku.html>
- [78] HOLUBÁŘ, Pavel a Mojmir JÍLEK. *Představení firem SHM a PIVOT - 2011* [online]. [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: <https://is.muni.cz/el/1431/podzim2011/F5900/um/prezen/SHM-1.pdf>

- [79] MAREK, Pavel. Prestižní ocenění za vývoj PVD povlaků. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2017, (12) [cit. 2018-03-31]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prestizni-oceneni-za-vyvoj-pvd-povlaku.html>
- [80] TRITREMEL, C., R. DANIEL, M. LECHTHALER, H. RUDIGIER, P. POLCIK a C. MITTERER. Microstructure and mechanical properties of nanocrystalline Al–Cr–B–N thin films. *Surface & Coatings Technology* [online]. Elsevier B.V, 2012, **213**, 1-7 [cit. 2018-03-22]. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2012.09.055. ISSN 0257-8972.
- [81] KALSS, W., A. REITER, V. DERFLINGER, C. GEY a J.L. ENDRINO. Modern coatings in high performance cutting applications. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* [online]. Elsevier, 2006, **24**(5), 399-404 [cit. 2018-04-01]. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2005.11.005. ISSN 0263-4368.
- [82] JANKŮ, Roman. *SHM-povlaky*. [elektronická pošta]. [cit. 2018-03-30].
- [83] JANKŮ, Roman. *SHM – odjehlení*. [elektronická pošta]. [cit. 2018-05-08].
- [84] DANĚK, Lukáš. *Výrobní tolerance pilových kotoučů*. [elektronická pošta]. [cit. 2018-05-14].
- [85] FNK 25 A. *Technické parametry stroje*.
- [86] Portálové obráběcí centrum MCV 1210. *TAJMAC-ZPS*[online]. Zlín [cit. 2018-05-03]. Dostupné z: <http://www.tajmac-zps.cz/cs/MCV-1210>
- [87] *TAJMAC-ZPS MCV 1210. Technické parametry stroje*.
- [88] DANĚK, Lukáš. *Řezné podmínky*. [elektronická pošta]. [cit. 2018-05-03].
- [89] PÍŠKA, Miroslav. Nová metodika hodnocení řezných vlastností nástrojů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2017, (5) [cit. 2018-05-03]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nova-metodika-hodnoceni-reznych-vlastnosti-nastroju.html>
- [90] JÄGER, A. a V. GÄRTNEROVÁ. Elektronovým mikroskopem do nitra materiálů aneb jak vypadá jejich struktura. *Fyzikální ústav Akademie věd ČR* [online]. [cit. 2018-04-03]. Dostupné z: <https://www.fzu.cz/popularizace/elektronovym-mikroskopem-do-nitra-materialu-aneb-jak-vypada-jejich-struktura>
- [91] CHVÁTALOVÁ, Lucie. *ELEKTRONOVÉ MIKROSKOPY* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2003 [cit. 2018-04-03]. Dostupné z: http://www.fch.vut.cz/~zmeskal/obring/presentace_2003/20_elektronove_mikroskopy.pdf.
- [92] FUČÍK, Jiří. *Řezání povlakovanými nástroji*. [elektronická pošta]. [cit. 2018-05-22]

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
A	[-]	tažnost
AW	[-]	AntiWear – aditiva potlačující otěr dvou povrchů
BSE	[-]	Back Scattered Electrons – zpětně odražené elektrony
CERC	[-]	Central Rotating Cathode – katoda umístěná ve středu povlakovací komory
CNC	[-]	Computer Numerical Control – stroj řízený počítačem
Dmo5	[-]	materiál pilových kotoučů bez kobaltu
Emo5	[-]	materiál pilových kotoučů s kobaltem
EP	[-]	Extreme Pressure - vysokotlaké
HB	[-]	tvrdost dle Brinella
HRC	[-]	tvrdost dle Rockwella
HSC	[-]	High Speed Cutting – vysokorychlostní obrábění
HSS	[-]	High Speed Steel – rychlořezná ocel
KNB	[-]	kubický nitrid boru
LARC	[-]	Lateral Rotating Cathodes – katody umístěné ve dveřích povlakovací komory
PD	[-]	polykrystalický diamant
PVD	[-]	Physical Vapour Deposition – fyzikální napařování
Ra	[-]	střední aritmetická úchylka profilu
Re	[-]	mez kluzu
Rm	[-]	mez pevnosti
RO	[-]	rychlořezná ocel
R_{p0,2}	[-]	nevýrazná mez kluzu (pro 0, 2% deformaci)
SE	[-]	Secondary Electrons – sekundární elektrony
SEM	[-]	Secondary Electron Microscope – rastrovací elektronový mikroskop
SK	[-]	slinutý karbid
TEM	[-]	transmission Electron Microscope – transmisní elektronový mikroskop

Symbol	Jednotka	Popis
A_{Di}	[mm ²]	jmenovitý průřez třísky i-tého zubu
A_{Dmax}	[mm ²]	maximální jmenovitý průřez třísky
a_e	[mm]	radiální hloubka řezu
a_p	[mm]	šířka záběru ostří
D	[mm]	průměr nástroje
F	[N]	celková síla
F_c	[N]	řezná síla
F_{ci}	[N]	řezná síla působící na i-tý zub
F_{cNi}	[N]	normálová řezná síla působící na i-tý zub
F_f	[N]	posuvová síla
F_{fi}	[N]	posuvová síla působící na i-tý zub
F_{fN}	[N]	normálová posuvová síla
F_{fNi}	[N]	normálová posuvová síla působící na i-tý zub
F_i	[N]	celková síla působící na i-tý zub
F_p	[N]	pasivní síla
F_x	[N]	síla ve směru osy x
F_y	[N]	síla ve směru osy y
f_z	[mm]	posuv na zub
F_z	[N]	síla ve směru osy z
f_{zb}	[mm]	posuv na zub pro kotouč s povlakem BIGAAN
h_i	[mm]	jmenovitá tloušťka třísky i-tého zubu
h_{max}	[mm]	maximální tloušťka třísky
$k_{c1,1}$	[MPa]	měrná řezná síla pro jednotkový průřez třísky
k_{ci}	[MPa]	měrná řezná síla působící na i-tý zub
L	[mm]	obráběná dráha
m_c	[-]	koeficient
M_k	[Nm]	krouticí moment
n	[min ⁻¹]	otáčky nástroje
N_b	[Kč]	cena kotouče s povlakem BIGAAN

N_{hs}	[Kč.h ⁻¹]	hodinová sazba stroje
N_{jsb}	[Kč]	náklady za směnu pro kotouč s povlakem BIGAAN
N_{jsk}	[Kč]	náklady za jednu směnu pro nepovlakovaný kotouč
N_k	[Kč]	cena nepovlakovaného kotouče
n_z	[-]	počet zubů v záběru
P_{cb}	[%]	procentuální nárůst nákladů
t	[min]	čas obrábění
t_{AS}	[min]	jednotkový strojní čas
t_{ASb}	[min]	jednotkový strojní čas pro kotouč s povlakem BIGAAN
t_{js}	[h]	čas jedné směny
VB	[mm]	šířka fazetky opotřebení na hřbetě
v_c	[m.min ⁻¹]	řezná rychlost
v_e	[m.min ⁻¹]	rychlost řezného pohybu
v_f	[mm.min ⁻¹]	posuvová rychlost
x_{js}	[-]	teoretický počet vyrobených součástek za směnu
x_{jsb}	[-]	minimální teoretický počet vyrobených součástek za směnu pro povlak BIGAAN
z	[-]	počet zubů
α	[°]	úhel hřbetu
α_o	[°]	ortogonální úhel hřbetu
γ	[°]	úhel čela
γ_o	[°]	ortogonální úhel čela
λ_s	[°]	úhel sklonu hlavního ostří
μ	[-]	koeficient tření
ρ	[°]	úhel svírající síly F_f a F
φ_i	[°]	úhel posuvového pohybu pro i-tý zub
φ_{max}	[°]	maximální úhel posuvového pohybu
ψ	[°]	úhel svírající síly F a F_c

SEZNAM PŘÍLOH

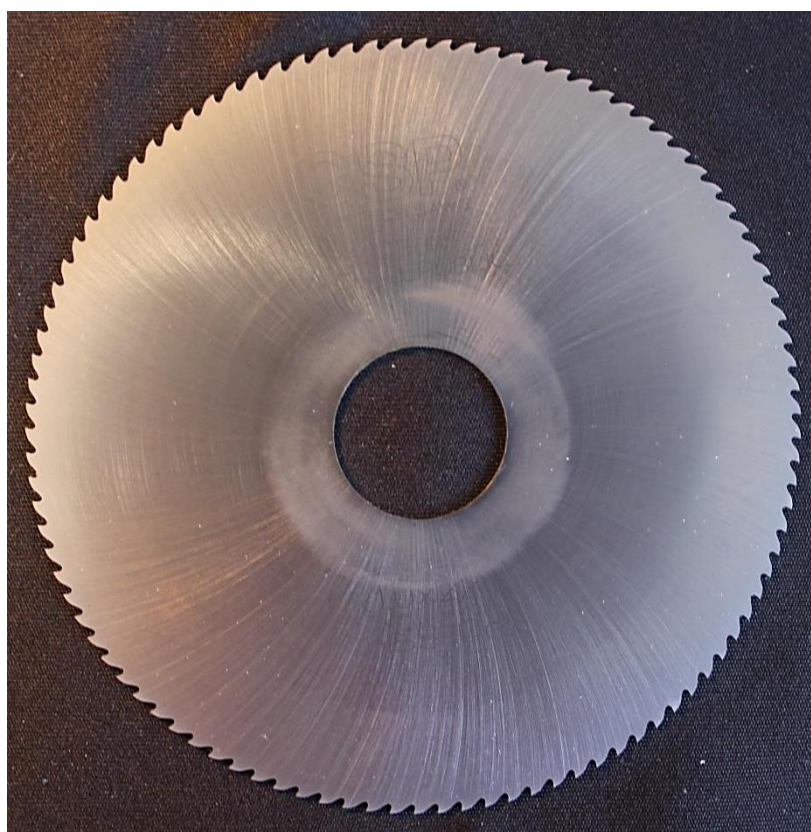
PŘÍLOHA 1

Fotografie pilových kotoučů použitých pro experiment

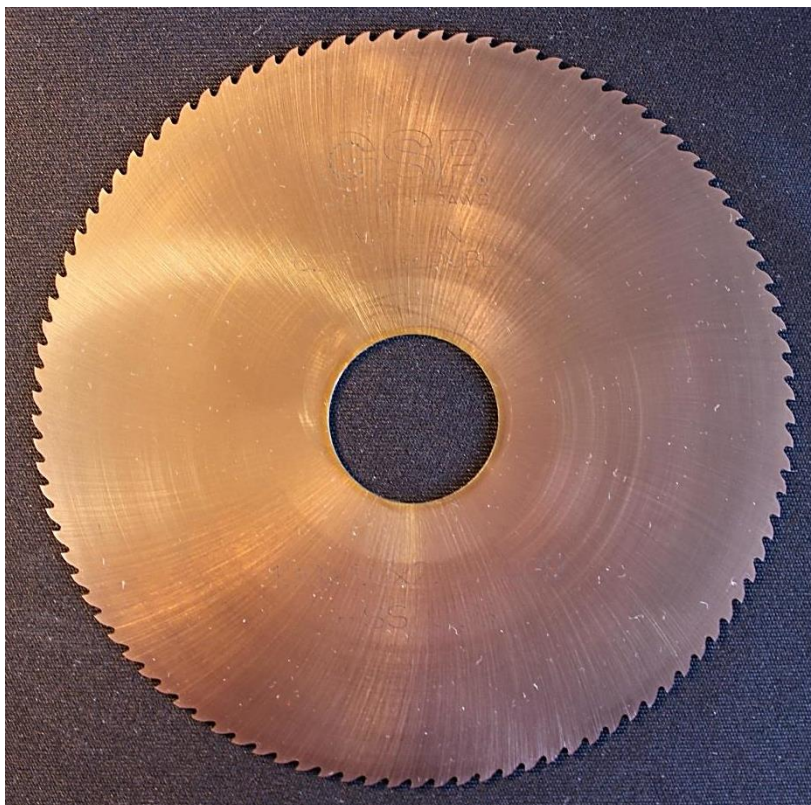
PŘÍLOHA 1



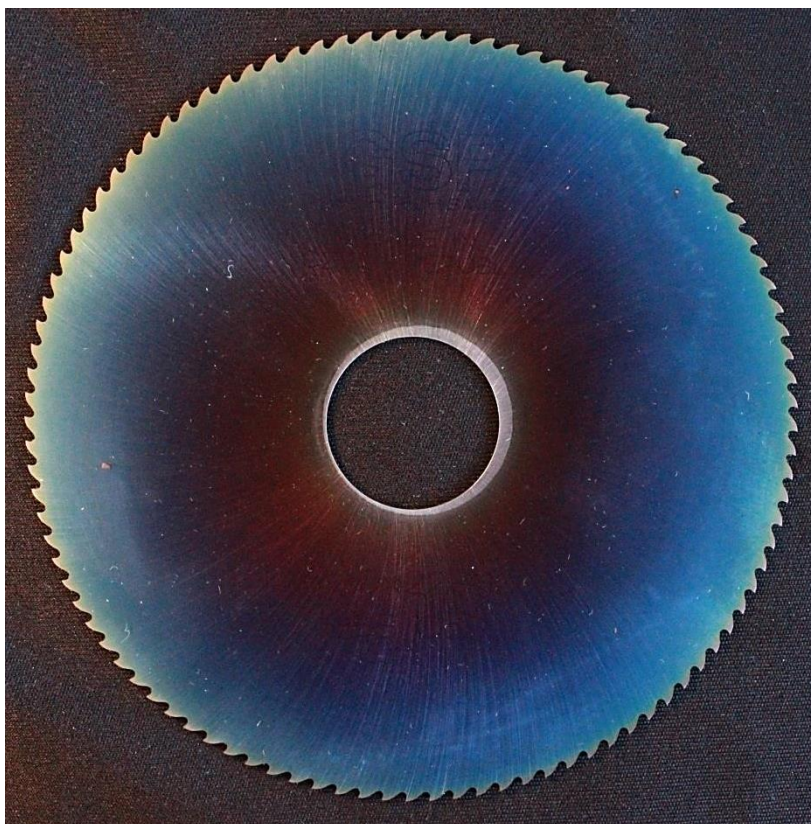
NEPOVLAKOVANÝ
PILOVÝ KOTOUČ



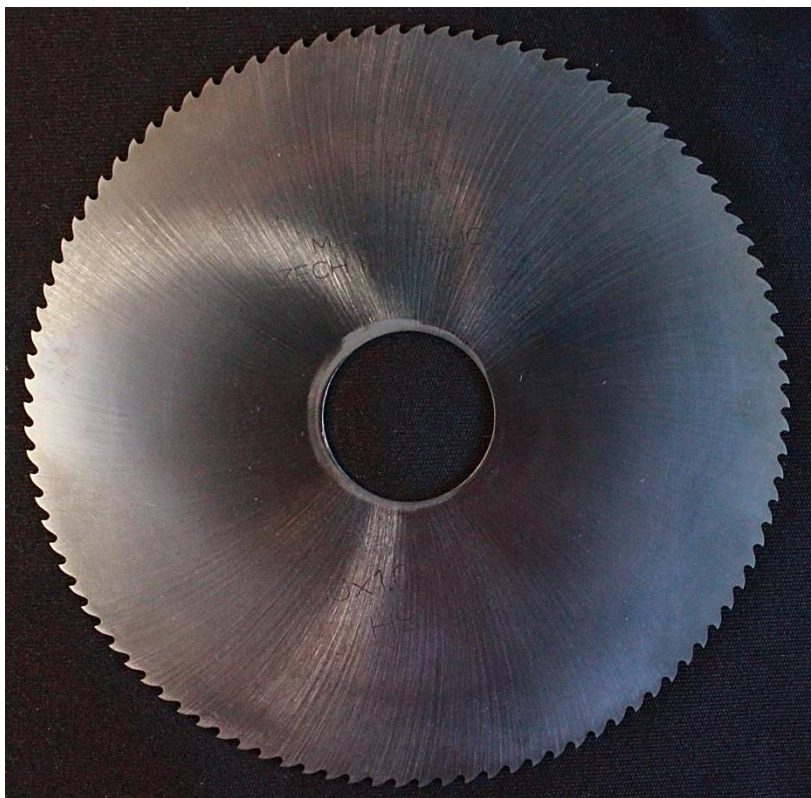
PILOVÝ KOTOUČ S
POVLAKEM ALWIN



PILOVÝ KOTOUČ S
POVLAKEM TiCN MP



PILOVÝ KOTOUČ S
POVLAKEM
TripleCoating Cr



PILOVÝ KOTOUČ S
POVLAKEM BIGAAN